



**Christopher Feitosa da Silva**

**Modelo de localização-alocação ótima de servidores: Estudo de caso na ANAC**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, do Departamento de Engenharia Industrial da PUC-Rio.

Orientador : Prof. Silvio Hamacher  
Coorientadora: Dra. Janaina Figueira Marchesi

Rio de Janeiro  
abril de 2022



**Christopher Feitosa da Silva**

**Modelo de localização-alocação ótima de servidores: Estudo de caso na ANAC**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo:

**Prof. Silvio Hamacher**

Orientador

Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio

**Dra. Janaina Figueira Marchesi**

Co-orientadora

iFood

**Prof. Silvia Araujo dos Reis**

UnB

**Prof. Antonio Márcio Tavares Thomé**

Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 4 de abril de 2022

Todos os direitos reservados. A reprodução, total ou parcial do trabalho, é proibida sem a autorização da universidade, do autor e do orientador.

### **Christopher Feitosa da Silva**

Graduou-se em Engenharia Química na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio) no ano de 2019. Durante a formação, foi aluno de iniciação científica no instituto Tecgraf, no laboratório LASURF em parceria com a Shell, participando de projeto de pesquisa sobre utilização de surfactantes na recuperação avançada de petróleo (EOR). Desenvolveu o trabalho de conclusão de curso denominado: Simulação da interação rocha-fluido em reservatórios do pré-sal brasileiro.

#### Ficha Catalográfica

Feitosa da Silva, Christopher

Modelo de localização-alocação ótima de servidores: Estudo de caso na ANAC / Christopher Feitosa da Silva; orientador: Silvio Hamacher; coorientadora: Janaina Figueira Marchesi. – 2022.

86 f: il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Industrial, 2022.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Industrial – Teses. 2. Facility Location. 3. Otimização. 4. Revisão Sistematizada de Literatura. 5. Indústria aérea. 6. Programação inteira. I. Hamacher, Silvio. II. Marchesi, Janaina F.. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Industrial. IV. Título.

CDD: 658.5

À minha mãe, Fátima, e minha avó Adelaide;  
por sempre me incentivarem a seguir meus sonhos.

## Agradecimentos

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus e a minha família; Meus Pais, minha irmã Chayenne e meu sobrinho Kayky. Sem eles, nada seria possível. Nos momentos mais difíceis, eles estavam lá para tornar meu sonho realidade.

Gostaria de agradecer aos meus amigos, pelo suporte. Principalmente Alessandra e Renan, por ouvirem meus questionamentos; e Pedro, por ter me apoiado na decisão de iniciar o mestrado.

Gostaria de agradecer também ao meu Orientador Silvio Hamacher, por todos os ensinamentos ao longo do curso, e pela paciência de seguir me aturando, o que com certeza não foi fácil.

Um agradecimento especial à minha Co-orientadora, Janaina Marchesi. Por sempre ter estado presente e disponível para me ajudar, desde dúvidas simples sobre a tese, até questionamentos sobre o andamento do curso

Agradeço ao CNPq e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos e pela estrutura oferecida para o desenvolvimento deste trabalho. Agradeço também à todos os professores da PUC-Rio, desde a graduação ao mestrado, pelos quais sempre recebi grande apoio. Assim como todos os demais funcionários, que sempre garantiram um excelente ambiente de estudo para os alunos.

O presente trabalho foi realizado também com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Agradeço à ANAC por disponibilizar o caso estudado nesta dissertação, assim como os dados, e pela disponibilidade dos funcionários para realizar entrevistas e reuniões sobre o trabalho realizado.

## Resumo

Feitosa, Christopher; Hamacher, Silvio (Orientador); Marchesi, Janaina F. (Coorientadora). **Modelo de localização-alocação ótima de servidores: Estudo de caso na ANAC**. Rio de Janeiro, 2022. 86p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Ao longo dos últimos anos o desenvolvimento da Pesquisa Operacional foi fundamental para o crescimento da indústria aérea. No Brasil, o órgão responsável pela fiscalização da aviação civil é a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC). O objetivo da dissertação é desenvolver um modelo de otimização para localização-alocação de pessoal (servidores) e aplicá-lo à um estudo de caso da ANAC, no contexto de Safety Oversight. Uma revisão sistematizada de literatura foi conduzida para identificar os gaps e soluções recentes na literatura de problemas de facility location. O objetivo descrito foi alcançado e o modelo matemático foi validado pelo Estudo de Caso proposto. O modelo alocou 31% dos servidores da ANAC na Região Sudeste do Brasil, 25% na Região Nordeste, 17% na Região Norte, 17% na Região Sul e 10% na Região Centro-Oeste; reduzindo em 66% a quantidade total de inspetores. Obteve-se ainda uma matriz de distribuição de capacitações por agência da ANAC, de forma que o tomador de decisão possa analisar o perfil ótimo de habilitações dos funcionários de cada agência. Uma análise de sensibilidade foi conduzida para avaliar a flexibilidade do modelo, que se mostrou eficiente para aplicações em problemas reais.

## Palavras-chave

Facility Location; Otimização; Revisão Sistematizada de Literatura; Indústria aérea; Programação inteira.

## Abstract

Feitosa, Christopher; Hamacher, Silvio (Advisor); Marchesi, Janaina F. (Co-Advisor). **Personnel optimal location-allocation Model: Case study at ANAC**. Rio de Janeiro, 2022. 86p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Over the last years, Research Operations development has become fundamental for Aviation Industry. In Brazil, the agency responsible for Civil Aviation inspection is the National Agency of Civil Aviation (ANAC). This work aims the development of an optimal personnel location-allocation model and application in a case study at ANAC in Safety Oversight context. One Literature Review has been done for gaps identification and to find the most recent solution techniques for facility location problems. The research objective has been achieved, and the proposed case study has validated the model. The model located 31% of ANAC personnel in Brazilian Southeast Region, 25% in Northeast Region, 17% in North Region, 17% in South Region and 10% in Central-West Region; decreasing in 66% the total quantity of allocated inspectors. A capacities matrix has been constructed with model results; decision-makers can analyze the optimal distribution of personnel capacities in each facility. Finally, a sensitivity analysis has been done to test the model flexibility, which prove the model is efficient for real problems application.

## Keywords

Facility Location; Optimization; Literature Review; Aviation Industry; Integer Programming.

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>Referencial Teórico</b>	<b>15</b>
2.1	Problemas de Localização	15
2.1.1	Problemas de Mediana (p-mediana)	16
2.1.2	Problemas de Cobertura (set-covering)	18
2.1.3	Problemas de Centralização (p-center)	20
2.2	Revisão Sistematizada de Literatura sobre Problemas de Localização	21
2.2.1	Metodologia da RSL	21
2.2.2	Resultados estatísticos da RSL	25
2.2.3	Classificação dos Artigos	27
2.2.4	Análise e Discussão dos Resultados da RSL	32
2.3	Modelo Estratégico de Localização-Alocação de pessoal	35
<b>3</b>	<b>Estudo de Caso</b>	<b>37</b>
3.1	Metodologia	37
3.2	Descrição do Problema	38
3.3	Coleta de Dados	39
3.4	Análise do dataset	42
<b>4</b>	<b>Tratamento dos Dados e Formulação Matemática</b>	<b>45</b>
4.1	Tratamento dos Dados	45
4.2	Formulação Matemática	48
<b>5</b>	<b>Resultados e Discussão</b>	<b>51</b>
5.1	Resultados Computacionais	51
5.2	Resultado do Estudo de Caso	55
5.3	Análise de Sensibilidade	62
<b>6</b>	<b>Conclusão</b>	<b>69</b>
<b>A</b>	<b>Apêndice: Resultados do Estudo de Caso</b>	<b>83</b>

## Lista de figuras

Figura 2.1	Fluxograma de coleta e seleção de artigos. (Produzido pelo autor)	23
Figura 2.2	Autores mais citados localmente. (produzido pelo autor)	25
Figura 2.3	Artigos mais citados externamente. (produzido pelo autor)	27
Figura 2.4	Journals mais relevantes. (produzido pelo autor)	28
Figura 2.5	Palavras-chave mais relevantes. (produzido pelo autor)	28
Figura 3.1	Rede de Núcleos Regionais da ANAC. (Relatório ANAC 2018)	39
Figura 3.2	Exemplo Dataset: Demandas (Produzido pelo autor)	42
Figura 3.3	Exemplo Dataset: Atividades (Produzido pelo autor)	43
Figura 3.4	Exemplo Dataset: Capacitações (Produzido pelo autor)	43
Figura 3.5	Exemplo Dataset: Viagens (Produzido pelo autor)	44
Figura 5.1	Gráfico da quantidade de variáveis	55
Figura 5.2	Gráfico do tempo de processamento	55
Figura 5.3	Distribuição de servidores: Teste 6	57
Figura 5.4	Servidores por região	57
Figura 5.5	Porcentagem de servidores de demanda por região	58
Figura 5.6	Gráfico de Análise de Sensibilidade	64
Figura 5.7	Distribuição de servidores: $\beta$ 0.2	65
Figura 5.8	Distribuição de servidores: $\beta$ 0.8	65
Figura 5.9	Custo de Servidores: $\beta = 0.4$ e $\beta = 0.8$	66
Figura 5.10	Comparação entre testes com custo de servidores	67
Figura A.1	Distribuição de servidores: Teste 3	84
Figura A.2	Distribuição de servidores: Teste 4	85
Figura A.3	Distribuição de servidores: Teste 5	85

## Lista de tabelas

Tabela 2.1	Referências mais citadas pelos artigos selecionados	26
Tabela 2.2	Estudos de caso HLP	29
Tabela 2.3	Classificação HLP	29
Tabela 2.4	Estudos de Caso Bio Supply Chain e Supply Chain	30
Tabela 2.5	Classificação Bio Supply Chain e Supply Chain	30
Tabela 2.6	Estudos de Caso Humanitarian Logistics e City Logistics	31
Tabela 2.7	Classificação Humanitarian Logistics e City Logistics	32
Tabela 2.8	Estudos de Caso Waste, Healthcare e Outros	33
Tabela 2.9	Classificação Waste, Healthcare a Outros	33
Tabela 4.1	Índices do modelo	45
Tabela 4.2	Parâmetros do algoritmo de tratamento dos dados	46
Tabela 4.3	Parâmetros do modelo	48
Tabela 4.4	Variáveis do modelo	49
Tabela 5.1	Resultados Computacionais: Teste 1	51
Tabela 5.2	Resultados Computacionais: Teste 2	52
Tabela 5.3	Resultados Computacionais: Teste 3	52
Tabela 5.4	Resultados Computacionais: Teste 4	53
Tabela 5.5	Resultados Computacionais: Teste 5	54
Tabela 5.6	Resultados Computacionais: Teste 6	54
Tabela 5.7	Resultados: Teste 6	56
Tabela 5.8	Matriz de alocação de capacidades por regional	59
Tabela 5.9	Análise de Sensibilidade	63
Tabela 5.10	Análise de Sensibilidade	63
Tabela 5.11	Análise de Sensibilidade com Custo de Servidores	67
Tabela A.1	Resultados: Teste 3	83
Tabela A.2	Resultados: Teste 4	84
Tabela A.3	Resultados: Teste 5	86

## Lista de Abreviaturas

ANAC – Agência Nacional de Aviação Civil do Brasil

FLP – *Facility Location Problems*

HLP – *Hub Location Problems*

RSL – Revisão Sistemática de Literatura

# 1 Introdução

Segundo Barnhart et al. (2003), com exceção da indústria militar, é difícil imaginar outra indústria que esteja mais ligada a pesquisa operacional do que a aviação, pois a operação de linhas aéreas e transporte aéreo fornecem naturalmente diversos problemas de otimização para utilização de técnicas de pesquisa operacional; além do fato de que a indústria da aviação é uma das líderes na utilização de tecnologia da informação. Os autores mostram ainda que o desenvolvimento da pesquisa operacional ao longo dos anos foi fundamental para o crescimento da indústria aérea, que passou de um transporte de elite para uma indústria que atende demanda em massa.

Barnhart et al. (2003) realizaram ainda uma revisão de literatura e apresentaram 3 categorias principais de problemas enfrentados pela indústria da aviação: a) Planejamento e Scheduling, que envolve problemas relacionados a atendimento da demanda, agenda de voos e tripulação, rotas e definição de centros de manutenção. Essa categoria trata de problemas voltados no geral para aplicação de técnicas de pesquisa operacional como programação matemática e modelagem, envolvendo grande complexidade devido ao número elevado de restrições que podem surgir. b) Gestão de receita, que aborda problemas relacionados a otimização do lucro de operação envolvendo questões como precificação e overbooking. Essa categoria de problemas promove a aplicação de técnicas de simulação, previsão e modelagem estocástica, que necessitam de geração de dados confiáveis para a tomada de decisões. c) Planejamento de infraestrutura, que aborda problemas de design e localização de estruturas necessárias para o funcionamento da indústria aérea, como os aeroportos por exemplo.

Além da relação com a pesquisa operacional, alguns estudos mostram que a aviação e a economia possuem também uma ligação. Segundo Baker et al. (2015), o desenvolvimento da indústria aérea promove o crescimento da economia de quatro formas diferentes: por impacto direto pela construção e operação de aeroportos; por impacto indireto devido a cadeia de suprimentos de bens e serviços; por indução pelo aumento de rotação da economia promovido pela geração de empregos; por impacto catalítico, quando o crescimento da estrutura aeroportuária gera melhora econômica e por consequência atraí

novos investimentos regionais. Green (2007) alerta porém que a relação entre economia e indústria aérea, apesar de facilmente identificada, não é clara quanto ao sentido, ou seja, o desenvolvimento da indústria aérea gera crescimento da economia ou uma economia forte é o que promove melhoras na aviação? Segundo Dantas et al. (2017), a literatura mostra que a direção de causalidade desta relação se altera de acordo com o contexto de aplicação do estudo, ou seja, características sociais, econômicas, políticas, espaciais e culturais de cada região alteram a relação de causalidade. Baker et al. (2015) realizam o estudo de causalidade na Austrália e concluem que o efeito ocorre em ambas as direções, ou seja, uma relação bicausal na qual economia e aviação são impactantes e impactadas juntas. Marazzo et al. (2010) realizam o estudo de causalidade no Brasil, uma economia emergente, e apresentam resultados que indicam nesse caso uma relação mais forte na direção do crescimento econômico para o desenvolvimento da aviação do que o contrário, o que mostra que no Brasil, no ano do experimento, era importante o investimento em infraestrutura de transporte aéreo para desenvolvimento regional a longo prazo. Marazzo et al. (2010) comentam ainda sobre o cenário de crise que o Brasil enfrentava na época da pesquisa realizada, no qual os resultados obtidos pelos autores ratifica a importância da indústria da aviação na recuperação econômica do país. Esses resultados podem ser transportados para o tempo da presente dissertação de mestrado, onde pode-se observar um impacto grande na aviação civil devido a pandemia de COVID-19, como demonstra Nicola et al. (2020), e à importância do transporte aéreo no processo de recuperação da crise (AIR CARGO WORLD, 2020).

Toda a relação entre pesquisa operacional, indústria da aviação e crescimento econômico leva a importância de se realizar estudos e pesquisas nessas áreas e suas interlocuções, pois assim como destacado por Hakim e Merkert (2016), a necessidade desses trabalhos está no auxílio à tomada de decisões; agências governamentais por exemplo, assim como empresas aéreas e/ou indústrias que dependam do transporte aéreo na cadeia de suprimentos estão diretamente envolvidas, tanto na tomada das decisões como nas consequências destas.

No contexto do planejamento estratégico e no auxílio à tomada de decisões, conforme destacado por Şahin et al. (2007), o processo de localização-alocação com foco na distribuição ótima da rede de estruturas que visa garantir que uma determinada organização consiga oferecer os seus serviços com qualidade e de forma espacialmente bem distribuída em uma região, otimizando o atendimento às demandas de diferentes nós regionais, é denominado processo de Regionalização.

Com base no que foi discutido, o atual trabalho tem o objetivo de desenvolver um modelo estratégico de localização-alocação capaz de otimizar o processo de regionalização. A construção e a aplicação deste modelo é pautada por um estudo de caso na Agência Nacional de Aviação Civil do Brasil (ANAC), em um problema que visa otimizar a distribuição de agências regionais, inspetores (servidores públicos) e suas capacitações, para garantir o atendimento às demandas de fiscalização do órgão. Para atingir o objetivo principal, são traçadas 3 etapas de desenvolvimento que devem ser alcançadas ao longo do trabalho:

- (i) Condução de uma Revisão Sistematizada de literatura sobre problemas de localização aplicados à estudos de casos reais para auxiliar na identificação de desafios a serem enfrentados no presente trabalho e das técnicas aplicadas para solução destes problemas nos últimos anos;
- (ii) Desenvolvimento do modelo matemático e aplicação utilizando a linguagem de programação Julia, através da interface JuMP;
- (iii) Análise de sensibilidade para interpretação dos resultados obtidos.

A dissertação está dividida em 7 seções; A introdução, presente seção, apresenta o contexto abordado no trabalho, justifica a pesquisa e expõe os objetivos traçados para o projeto. O segundo capítulo apresenta o referencial teórico, expondo as técnicas clássicas aplicadas em problemas de localização e a Revisão Sistematizada de literatura. O terceiro capítulo descreve o estudo de caso que será conduzido. O Capítulo 4 apresenta a modelagem matemática desenvolvida no trabalho, assim como os parâmetros, índices e variáveis do modelo. O Capítulo 5 apresenta e discute os resultados da pesquisa, enquanto o Capítulo 6 traz as conclusões obtidas. Na última seção são apresentadas as referências bibliográficas, assim como os artigos analisados na Revisão Sistematizada de literatura.

## 2

### Referencial Teórico

Nesta seção da dissertação é apresentado o referencial teórico utilizado para a pesquisa e os principais modelos de localização são descritos e exemplificados. A Revisão Sistematizada de Literatura sobre problemas de localização aplicados em estudos de casos reais é também apresentada neste capítulo, sendo esta um dos objetivos traçados na seção de Introdução.

#### 2.1

##### Problemas de Localização

Owen e Daskin (1998) definem os problemas de localização de instalações (Facility Location) como problemas de planejamento estratégico que envolvem um cenário pré compra ou desenvolvimento de uma facility, nos quais são tomadas decisões como: identificar uma boa localização de instalação, especificar capacidades ideais para a operação, otimizar a alocação de capital, dentre outras. Segundo os autores, problemas de facility location englobam tanto empresas públicas quanto empresas privadas, quando estão diante da necessidade de planejar expansões, realocações ou adaptações de instalações frente à novos desafios.

Melo et al. (2009) descrevem que problemas de facility location possuem um conjunto de consumidores com uma determinada demanda a ser atendida e um conjunto de instalações para atender essa demanda, de forma que a solução dos problemas busca responder questões como quais facilities serão abertas e/ou usadas e suas localizações e quais consumidores serão atendidos por qual unidade (alocação), de forma a otimizar uma métrica, como custo, distância ou tempo, por exemplo. Klose e Drexel (2005) ratificam essa definição fornecendo exemplos, como indústrias que precisam localizar suas fábricas e alocar plantas e armazéns, localização de lojas; assim como agentes públicos precisam definir a localização ideal de escolas, hospitais, bombeiros; de forma que a qualidade dos serviços depende das decisões de localização e alocação. Murali et al. (2012) discutem sobre o problema de localização de instalações de preparo e resposta a desastres; já Wang, Gong et al. (2020) argumentam sobre aplicações de Facility Location na saúde. Murali et al. (2012), assim como Wang, Gong et al. (2020), evidenciam os desafios enfrentados pelos tomadores

de decisão; uma decisão de localização ruim de uma determinada instalação pode significar o aumento no tempo de atendimento na saúde, assim como nas respostas a desastres, resultando em perdas irreparáveis.

Owen e Daskin (1998) categorizam as principais abordagens pelas funções objetivo, para diferentes aplicações, em exemplos gerais como: Problemas de mediana; Problemas de cobertura e Problemas de centralização; conforme será descrito nas subseções a seguir.

### 2.1.1

#### Problemas de Mediana (p-mediana)

Segundo Richard L Church e Charles S ReVelle (1976), uma das formas de medir a efetividade de um determinado sistema é pela distância média ou tempo médio de deslocamento dos clientes que usarão as instalações, de forma que uma opção para planejar a localização dessas instalações de maneira ótima é construir uma função objetivo para minimizar a distância média total de viagem. Essa técnica de modelagem foi citada primeiramente no trabalho de Hakimi (1964), conforme será descrito a seguir.

$$FO = \text{MIN} \sum_{ij} h_i d_{ij} Y_{ij} \quad (2-1)$$

Sujeito a:

$$\sum_j X_j = P \quad (2-2)$$

$$\sum_j Y_{ij} = 1; \forall(i) \quad (2-3)$$

$$Y_{ij} - X_j \leq 0; \forall(ij) \quad (2-4)$$

$$X_j \in \{0, 1\}; \forall(j) \quad (2-5)$$

$$Y_{ij} \in \{0, 1\}; \forall(ij) \quad (2-6)$$

Onde  $i$  é o índice do nó de demanda,  $j$  é o índice do nó elegível de instalação da facility,  $h_i$  é a demanda do nó  $i$ ,  $d_{ij}$  é a distância entre os pontos  $i$  e  $j$ , e  $P$  é o número total de instalações que devem ser localizadas.

A Variável  $Y_{ij}$  define a alocação da demanda localizada em um nó  $i$  a uma determinada facility  $j$  ( $Y_{ij} = 1$ ) ou não ( $Y_{ij} = 0$ ); enquanto a Variável  $X_j$  define a localização de uma instalação em  $j$  ( $X_j = 1$ ) ou não ( $X_j = 0$ ).

A Equação (2-1) é a função objetivo do problema, que visa minimizar o produto entre a distância percorrida e a demanda de cada nó. A Equação (2-2) restringe o número de instalações ao valor total definido anteriormente

pelo problema (P). A Restrição (2-3) garante que cada nó de demanda só será atendido por uma instalação. A Restrição (2-4) garante que um nó de demanda será alocado a uma facility apenas se essa for instalada pelo modelo. As Equações (2-5) e (2-6) garantem que as variáveis sejam binárias, ou seja, só possam assumir o valor "0" ou "1".

A modelagem base apresentada por Hakimi (1964) pode ser aplicada em diferentes problemas e contextos. Upchurch e Kuby (2010) apresentam um exemplo de aplicação da técnica de modelagem p-mediana para o problema de localização de postos de combustível. No artigo os autores têm como objetivo otimizar a localização de "p" postos de recarga de combustível no estado da Flórida, nos Estados Unidos, utilizando uma matriz de viagens realizadas no estado para avaliar a utilização do método proposto. Porém, nem sempre a modelagem base pode ser diretamente aplicada, necessitando de modificações e/ou novas restrições e sofisticações para resolver problemas em diferentes contextos. Um exemplo de sofisticação da modelagem ocorre na aplicação detalhada por Scaparra e Church (2008), na qual os autores formulam o problema de planejamento de proteção de infraestruturas em caso de desastres, como ataques terroristas. No artigo os autores utilizam como base a modelagem de p-mediana, porém com mudanças para adequar a solução ao problema proposto. Uma das técnicas de modelagem utilizada pelos autores é a formulação MINMÁX, na qual o problema é dividido em dois níveis, no contexto específico apresentado o primeiro nível tem por objetivo planejar a defesa fortificando um número específico de construções, enquanto no segundo nível "ocorre" o desastre, interditando um número específico de construções e promovendo o deslocamento no atendimento à demanda. No caso do problema apresentado, a função objetivo composta pelos dois níveis da modelagem visa minimizar o pior caso possível de interdições. Qingwei Li et al. (2013) também apresentam uma formulação parecida com a de Scaparra e Church (2008) para o problema de resposta à desastres, porém no caso descrito por Qingwei Li et al. (2013) o objetivo é mais geral, por apresentar soluções para o caso de rupturas nas cadeias de distribuição, utilizando a formulação MINMÁX, com a expansão da possibilidade de fornecer para cada nó de demanda uma instalação principal e uma instalação secundária acionada no caso de interdição da primeira. Dantrakul et al. (2014) também utilizam a modelagem p-mediana como base, adicionando extensões como o custo de instalação e capacidade variável nas facilities. Neste caso os autores utilizam técnicas de simulação para testar e comparar diferentes métodos de resolução para os problemas de localização envolvendo transporte.

### 2.1.2

#### Problemas de Cobertura (set-covering)

No problema de cobertura, considera-se que um nó de demanda está coberto apenas se existe uma facility instalada à uma distância ou tempo de viagem mínimo especificados. Um exemplo clássico de aplicação é o problema de localização de ambulâncias, onde a otimalidade ocorre ao atender os pacientes percorrendo uma distância ou tempo limite, devido a urgência no atendimento dessas demandas. A modelagem matemática desse problema é descrita a seguir: (OWEN; DASKIN, 1998)

$$FO = MIN \sum_j c_j X_j \quad (2-7)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j \in N_i} X_j \leq 1; \forall(i) \quad (2-8)$$

$$X_j \in \{0, 1\}; \forall(j) \quad (2-9)$$

Onde  $i$  é o índice do nó de demanda,  $j$  é o índice do nó elegível de instalação da facility e  $c_j$  é o custo de instalação.  $N_i$  é o conjunto de nós que estão dentro da área de cobertura, ou seja: ( $N_i = \{j | d_{ij} \leq S\}$ ); onde  $S$  é a distância ou tempo de deslocamento máximo aceito para estar na cobertura e  $d_{ij}$  é a distância entre o nó de origem  $i$  e a facility localizada em  $j$ .

A Variável  $X_j$  define se uma instalação é localizada em  $j$  ( $X_j = 1$ ) ou não ( $X_j = 0$ ).

A Equação (2-7) é a função objetivo do problema, que minimiza os custos de instalação ou, caso os custos sejam equivalentes para todas as facilities, minimiza o número de unidades localizadas. A Equação (2-8) restringe cada nó de demanda a ser atendida por ao menos uma instalação "j". A Equação (2-9) é a restrição de binaridade.

Como descrito nesta seção, problemas envolvendo atendimento à emergências estão entre as principais utilizações da modelagem por *set-covering*; Xueping Li et al. (2011) apresentam uma revisão sobre modelos de cobertura e técnicas de otimização voltados para localização de instalações de resposta à emergências utilizando como base a modelagem desenvolvida na Equação (2-7) e abordando outros autores que, assim como no caso da p-mediana, adicionaram especificidades voltadas para diferentes contextos de aplicação. Bao et al. (2015), por exemplo, apresentam um problema de localização de torres de monitoramento de incêndios florestais, no qual uma das mudanças na modelagem é justamente a adição de tipos diferentes de torres e câmeras, além da divisão

da área do problema em grids, de forma que a localização e a demanda são específicos de cada grid, aproximando o problema da realidade do contexto.

Richard Church e Charles ReVelle (1974) e Owen e Daskin (1998) comentam uma variação do problema de localização por cobertura que ocorre quando o tomador de decisão não possui a quantidade certa de facilities ou a quantidade de instalações disponíveis não atende toda a demanda. Nesses casos, pode-se alterar a função objetivo para maximizar a cobertura com os recursos disponíveis para o tomador de decisão. Os autores definem essa modelagem como Problema de localização de máxima cobertura (MCLP), conforme descrito a seguir.

$$FO = MÁX \sum_i h_i Z_i \quad (2-10)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j \in N_i} X_j \geq Z_i; \forall(i) \quad (2-11)$$

$$\sum_j X_j \leq P \quad (2-12)$$

$$X_j \in \{0, 1\}; \forall(j) \quad (2-13)$$

$$Z_i \in \{0, 1\}; \forall(i) \quad (2-14)$$

Onde  $i$  é o índice do nó de demanda,  $j$  é o índice do nó elegível de instalação da facility,  $h_i$  é a demanda no nó  $i$  e  $P$  é o máximo de facilities a serem localizadas.  $N_i$  é o conjunto de nós que estão na área de cobertura, ou seja: ( $N_i = \{j | d_{ij} \leq S\}$ ); onde  $S$  é a distância ou tempo de deslocamento máximo aceito para estar na cobertura e  $d_{ij}$  é a distância entre o nó de origem  $i$  e a instalação localizada em "j".

A Variável  $X_j$  define se uma instalação é localizada em  $j$  ( $X_j = 1$ ) ou não ( $X_j = 0$ ); já a Variável  $Z_i$  indica se um nó de demanda  $i$  está coberto por ao menos uma instalação ( $Z_i = 1$ ) ou não ( $Z_i = 0$ ).

A Equação (2-10) é a função objetivo do problema, que maximiza a área de cobertura. A restrição (2-11) indica que um nó de demanda só estará coberto ( $Z_i = 1$ ) quando houver uma instalação localizada à uma distância menor que "S" e ( $X_j = 1$ ). A restrição (2-12) garante que o número de instalações localizadas não pode ser maior que o número de instalações disponíveis. As equações (2-13) e (2-14) garantem que as variáveis sejam binárias, ou seja, só possam assumir o valor "0" ou "1".

Murali et al. (2012) resolvem o problema de resposta à um ataque bio-terrorista, utilizando a modelagem de máxima cobertura. O objetivo dos autores é garantir que em caso de ataque, a maior quantidade possível da população afetada tenha acesso aos medicamentos necessários em uma instalação próxima. No artigo é apresentada uma modelagem com algumas sofisticções para solucionar o problema, como por exemplo a adição de níveis diferentes de cobertura em cada nó de demanda.

### 2.1.3

#### Problemas de Centralização (p-center)

O Problema de máxima cobertura apresentado na sub-seção anterior costuma ser utilizado como uma alternativa quando o problema clássico de *set-covering* não possui resolução. Segundo Owen e Daskin (1998), outra alternativa para lidar com o objetivo de atender completamente à uma demanda é a modelagem denominada P-Center, ou Problema de Centralização, que também é conhecida como modelagem minmax. Owen e Daskin (1998) apresenta o modelo matemático conforme segue:

$$FO = MIN [D] \quad (2-15)$$

Sujeito a:

$$\sum_j X_j = P \quad (2-16)$$

$$\sum_j Y_{ij} = 1 ; \forall(i) \quad (2-17)$$

$$Y_{ij} - X_j \leq 0 ; \forall(i, j) \quad (2-18)$$

$$D \geq \sum_j d_{ij} Y_{ij} ; \forall(i) \quad (2-19)$$

$$X_j \in \{0, 1\} ; \forall(j) \quad (2-20)$$

$$Y_{ij} \in \{0, 1\} ; \forall(i, j) \quad (2-21)$$

Em relação às modelagens apresentadas para os outros problemas, o diferencial aqui é o aparecimento do parâmetro  $D$ , que é a máxima distância aceitável entre um nó de demanda e a instalação mais próxima. Dessa forma, a Equação (2-15) é a função objetivo do problema, que minimiza a máxima distância aceitável. A Equação (2-16) garante que  $P$  facilities serão localizadas pelo modelo. A Equação (2-17) garante que cada nó de demanda é atendido por

uma instalação, enquanto a Equação (2-18) restringe o problema a realizar a alocação de um nó de demanda a uma facility apenas se houver a instalação, assim como no problema de p-mediana. A Equação (2-19) é a definição do parâmetro  $D$ , restringindo o problema à máxima distância  $D$  entre um nó de demanda e a instalação mais próxima. As equações (2-20) e (2-21) são as restrições de binaridade.

## 2.2

### Revisão Sistematizada de Literatura sobre Problemas de Localização

Nesta seção é apresentada uma Revisão Sistematizada de Literatura (RSL) sobre problemas de localização aplicados em estudos de caso.

#### 2.2.1

##### Metodologia da RSL

A definição da metodologia segue algumas das diretrizes apresentadas por Thomé et al. (2016), que fornece uma base para a realização de revisões sistemáticas de literatura, definindo 8 passos:

- (i) Planejamento e formulação do problema;
- (ii) Busca na literatura;
- (iii) Coleta de material;
- (iv) Avaliação da qualidade do material coletado;
- (v) Análise e síntese do material coletado;
- (vi) Interpretação;
- (vii) Apresentação dos resultados;
- (viii) Update da revisão.

Como a pesquisa consiste na formulação de um modelo estratégico de localização para aplicação em um estudo de caso para o projeto de regionalização da ANAC, se faz necessário realizar não apenas uma revisão de literatura de modelos clássicos de facility location, como o realizado nas subseções anteriores, mas também buscar trabalhos recentes com modelos atuais aplicados à estudos de casos reais bem definidos. O objetivo é identificar as principais estratégias abordadas atualmente pelos autores e como superar os principais desafios que poderão surgir durante o desenvolvimento da pesquisa. Com base nesta descrição do problema, a primeira etapa consiste na elaboração

de uma pergunta de pesquisa bem definida: Quais as principais técnicas de modelagem inteira e contextos de aplicação destas técnicas nos últimos anos em problemas de localização?

Para responder a pergunta definida uma busca na literatura é conduzida. A etapa de busca na literatura e coleta de material têm sua metodologia definida com base no guia PRISMA para desenvolvimento de revisões sistemáticas de literatura (MOHER et al., 2015), dividida nas sub-etapas de identificação, screening e elegibilidade.

A Busca por artigos é realizada na plataforma SCOPUS, por ser uma plataforma com destaque na quantidade de artigos científicos em sua base (FALAGAS et al., 2008). Como a pesquisa possui o foco de aplicação na indústria da aviação, os problemas de localização podem ser identificados como Facility Location Problems (FLP) ou Hub Location Problems (HLP); assim a busca por trabalhos na literatura para a RSL foi dividida por palavras chave: Para FLP realizou-se a busca por “Facility Location” e “Integer Programming”; para HLP as palavras-chave utilizadas foram “Hub Location” e “Integer Programming”; com a utilização de operadores booleanos na plataforma Scopus. A utilização da palavra-chave “Integer Programming” se justifica para realizar um filtro inicial de trabalhos, garantindo que os resultados obtidos pela busca inicial contemplem não apenas a etapa de modelagem, mas também a estratégia de resolução do problema proposto por cada autor, utilizando diferentes técnicas e/ou softwares, como desenvolvimento de metaheurísticas ou solução via CPLEX. Foram obtidos 200 artigos de HLP e 1040 artigos de FLP.

A etapa seguinte consiste na coleta de material a partir da busca realizada. Para a qualificação do material coletado se faz necessário a aplicação de alguns filtros (*screening*). Na sequência define-se os critérios de inclusão com os quais os trabalhos são selecionados, dessa forma foram escolhidos apenas artigos, na língua inglesa, publicados entre 2016 e 2021 (mês de abril), para garantir que apenas os trabalhos mais recentes e relevantes sejam coletados nesta etapa.

Na fase de elegibilidade são aplicados dois critérios para exclusão dos artigos coletados inicialmente que não se apliquem à pergunta de pesquisa proposta na RSL; o primeiro critério consiste na leitura dos resumos para identificação apenas de artigos que apresentem aplicação em um estudo de caso; o segundo critério consiste na identificação dos artigos que, no corpo do texto, definam o estudo de caso e a modelagem de localização para aplicação real, com dados reais. A etapa de coleta e seleção de material está sintetizada no fluxograma apresentado na Figura (2.1), com a quantidade de artigos coletados em cada fase.

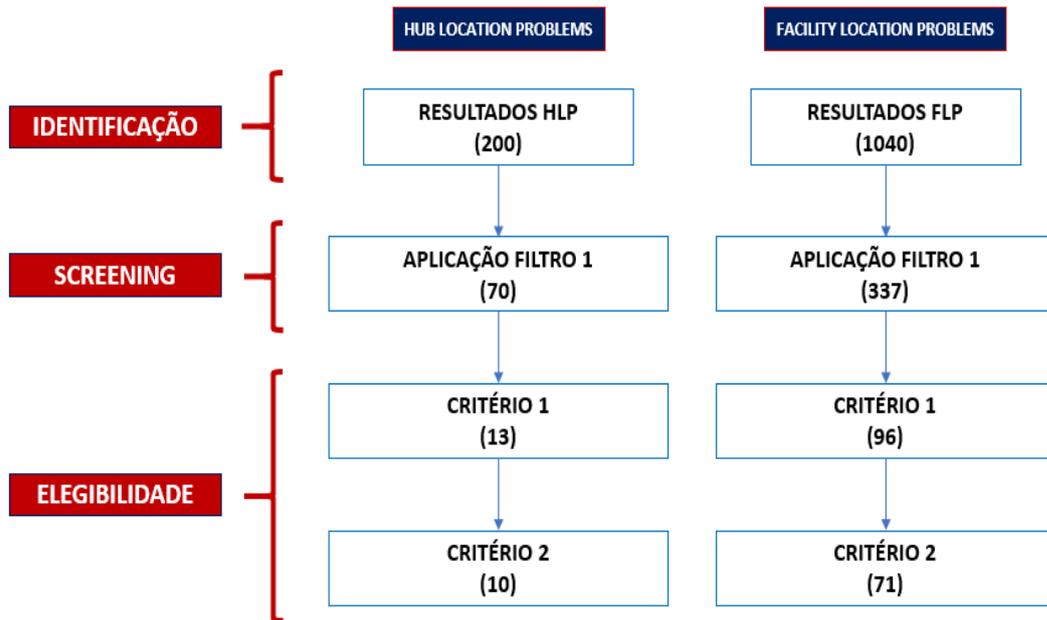


Figura 2.1: Fluxograma de coleta e seleção de artigos. (Produzido pelo autor)

A etapa de análise e síntese dos 81 artigos coletados ocorreu pela avaliação estatística do material, para identificação dos artigos mais citados, journals mais relevantes na seleção e principais palavras-chave citadas nos textos; a análise bibliométrica é realizada utilizando o pacote bibliometrix, disponível na linguagem de programação R (ARIA; CUCCURULLO, 2017). Em seguida, é realizada a classificação dos artigos para interpretação dos resultados, utilizando como base a metodologia de classificação apresentada por Farahani, Hekmatfar et al. (2013), com algumas adaptações para os problemas de FLP, conforme apresentado a seguir:

- ▷ Classificação quanto ao tipo de problema modelado: Programação Inteira (IP), Programação Inteira Linear (ILP), Programação Inteira Mista (MIP), Programação Inteira Mista Linear (MILP), Programação Inteira Mista Não-Linear (MINLP) e Programação Inteira Mista Linear Fracionária (MILFP);
- ▷ Classificação quanto ao modelo de localização proposto: Em termos de modelagem base, a classificação é feita em problemas de mediana, cobertura, máxima cobertura ou centralização; os modelos são classificados também em Capacitados (C), quando existe limitação de capacidade nas instalações a serem localizadas, e Não Capacitados (U), quando não há limitações quanto a capacidade;

- ▷ Classificação quanto a consideração de incertezas no modelo: Sim ou Não, de acordo com a presença de incertezas na forma de modelagem estocástica ou robusta;
- ▷ Classificação quanto a função objetivo do modelo: Os trabalhos são classificados nesta fase quanto ao objetivo do modelo proposto, podendo este variar de acordo com o contexto e a aplicação, como por exemplo minimizar custos ou maximizar a cobertura da demanda;
- ▷ Classificação quanto ao método de solução proposto: Nesta fase os trabalhos são classificados de acordo com a solução proposta para resolver o problema proposto no estudo de caso, podendo variar de acordo com o contexto e a aplicação, como por exemplo resolução utilizando um solver, ou desenvolvimento de uma metaheurística, como um algoritmo genético;
- ▷ Classificação quanto ao estudo de caso: Nesta fase os estudos de caso apresentados em cada artigo são classificados quanto a região de aplicação, contexto e problema a ser solucionado. Os contextos para classificação dos artigos de facility location são divididos em 7 setores, conforme segue:
  - (i) Bio Supply Chain: Concentra todos os artigos que tratam de problemas na cadeia de suprimentos em contextos e tecnologias menos agressivas ao meio ambiente.
  - (ii) Supply Chain: Artigos cujo estudo de caso apresenta problemas na cadeia de suprimentos e/ou logística industrial.
  - (iii) Humanitarian Logistics: Artigos com aplicações no contexto da logística humanitária, que inclui problemas relacionados a mitigação, prevenção e resposta à desastres naturais ou causados pelo homem.
  - (iv) Transport/City Logistics: Concentra todos os artigos cujo estudo de caso envolve problemas de localização no planejamento de redes de transporte e/ou logística urbana.
  - (v) Waste / Recycling / Reverse Logistics: Concentra todos os artigos que tratam de problemas de localização no contexto de logística reversa, reciclagem e logística do tratamento de lixo e resíduos.
  - (vi) Healthcare: Artigos que abordam problemas de localização na saúde, como localização de hospitais e ambulâncias.
  - (vii) Outros: Os demais artigos que não se enquadrem em quaisquer dos contextos apresentados.

Os artigos de Hub Location por sua vez são classificados em 3 contextos distintos, conforme segue:

- (i) Transport Network: Concentra todos os artigos com estudos de caso que envolvam o desenvolvimento de redes otimizadas de transporte, que são a maioria no contexto de hub location.
- (ii) Supply Chain: Artigos que apresentam problemas de design e otimização de cadeias de suprimentos.
- (iii) Postal Service: Estudos de caso envolvendo aplicação em serviços de correio.

### 2.2.2

#### Resultados estatísticos da RSL

Nesta seção serão apresentados os resultados estatísticos obtidos por análise bibliométrica para os 81 artigos selecionados, seguindo a descrição anteriormente definida na seção de metodologia da RSL. A Figura (2.2) apresenta os autores mais citados localmente, ou seja, mais citados pelos artigos da seleção realizada.

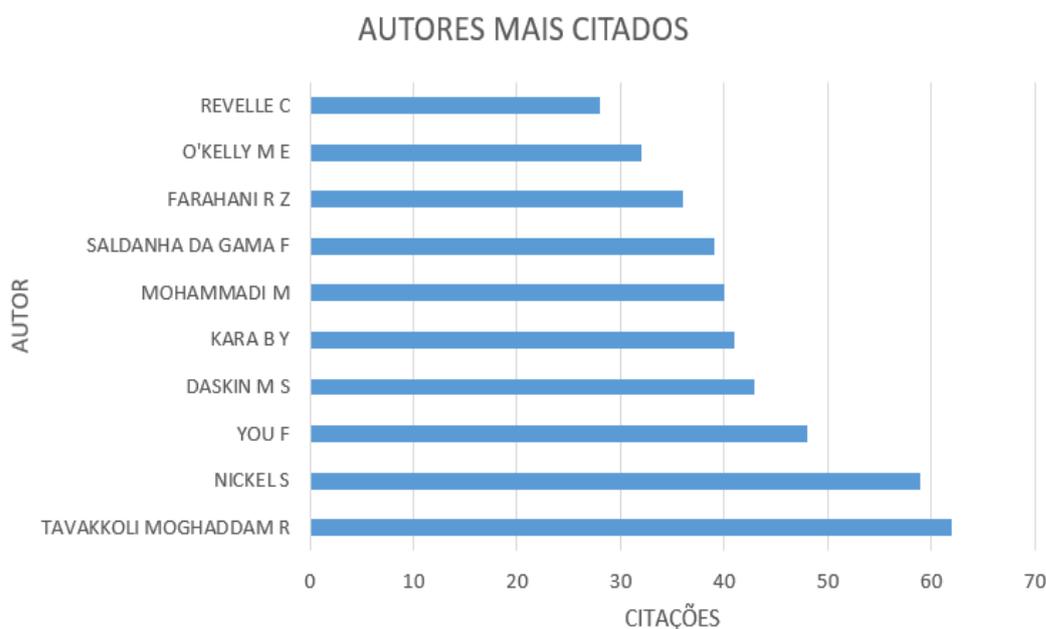


Figura 2.2: Autores mais citados localmente. (produzido pelo autor)

O Professor Reza Tavakkoli-Moghaddam, da *University of Tehran*, no Iran, apresenta 52 de índice h, com 593 trabalhos publicados segundo a plataforma Scopus (dados de abril de 2021), focados principalmente nos

tópicos de *Hub Location* (19 documentos entre 2015 e 2019) e *Supply Chain Design/Facility Location Problem* (14 documentos entre 2015 e 2019). O artigo Ramezani et al. (2013), do qual Tavakkoli-Moghaddam é um dos autores, é o que apresenta mais citações segundo o Scopus, e propõe um modelo estocástico multi objetivo para o design de cadeias logísticas (*forward/reverse*). Além de ser o mais citado localmente, o Professor Reza Tavakkoli-Moghaddam também é o autor com mais trabalhos presentes na seleção realizada para esta RSL, com 4 artigos: Mohammadi, Tavakkoli-Moghaddam et al. (2016), Mohammadi, Jula et al. (2017), Mahmoodjanloo et al. (2020) e Mokhtarzadeh et al. (2021). O Professor Stefan Nickel, da *Karlsruhe Institute of Technology*, na Alemanha, também está entre os mais citados pelos artigos da seleção. Segundo o Scopus, Nickel tem seus trabalhos focados principalmente nos tópicos de *Hub Location* (6 documentos entre 2015 e 2019) e *Location Problem* (5 documentos entre 2015 e 2019). O artigo Melo et al. (2009), já citado inclusive no presente trabalho, é o trabalho com mais citações dos quais o Professor Stefan Nickel é um dos autores, segundo a plataforma Scopus, e é também uma das referências mais citadas pelos artigos da seleção realizada nesta RSL, conforme descrito na tabela (2.1).

Tabela 2.1: Referências mais citadas pelos artigos selecionados

Referências	Journals	Citações
Campbell (1994)	EUR. J. OPER. RES	4
Farahani, Hekmatfar et al. (2013)	COMPUT. IND. ENG.	3
Farahani, Rezapour et al. (2014)	OMEGA	3
Melo et al. (2009)	EUR. J. OPER. RES	3
Mohseni et al. (2016)	ENERGY	3

É interessante observar ainda na tabela (2.1) a presença de dois artigos do Professor Reza Zanjirani Farahani, da *Kingston University*, em Londres, que também é um dos autores mais citados localmente segundo a Figura (2.2). Dois dos artigos com mais citações do Professor Farahani abordam o mesmo contexto que o presente trabalho; Farahani, SteadieSeifi et al. (2010) apresentam um survey sobre problemas de localização com múltiplos critérios, enquanto Farahani, Asgari et al. (2012) apresentam uma revisão sobre problemas de cobertura.

A Figura (2.3) mostra os artigos da seleção com maior número de citações.

O artigo de Miret et al. (2016) apresenta 76 citações, sendo o mais citado da seleção de 81 artigos; os autores realizam estudo sobre o design de cadeias de suprimento de bioetanol, comparando biomassa de primeira e segunda geração e abordando critérios específicos do problema que tornam o

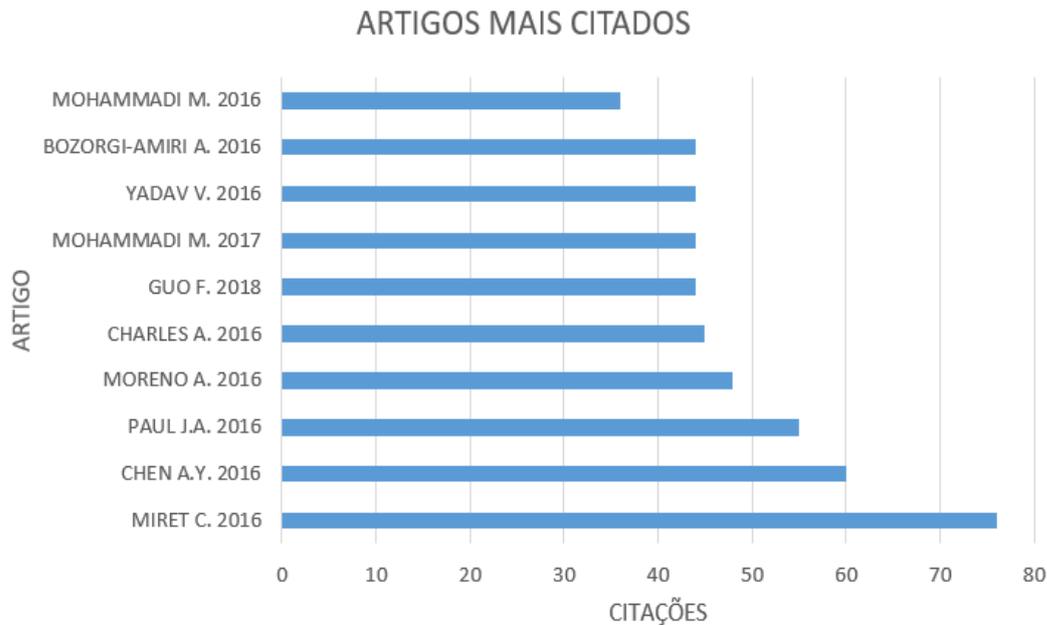


Figura 2.3: Artigos mais citados externamente. (produzido pelo autor)

trabalho mais completo e realístico, como critérios sociais e ambientais, além dos já tradicionais aspectos econômicos.

Complementar aos gráficos anteriores, a Figura (2.4) apresenta os journals mais relevantes para a coleção selecionada, ou seja, os que mais aparecem dentre os artigos coletados.

As palavras-chave mais utilizadas pelos autores foram contabilizadas e são apresentadas na Figura (2.5).

É possível observar que a Figura (2.5) mostra já algumas tendências da coleção abordada, como o elevado número de ocorrências das palavras-chave *mixed integer linear programming* e *supply chain*, porém essas tendências só serão ratificadas ou não com os resultados obtidos na classificação dos artigos, conforme será descrito nas próximas subseções.

### 2.2.3

#### Classificação dos Artigos

A Tabela (2.2) apresenta a classificação dos artigos de HLP por estudo de caso realizado e região onde o problema é aplicado.

A Tabela (2.3) complementa a classificação mostrada na Tabela (2.2), com foco no tipo de modelagem proposta (PROBLEM), função objetivo (FO), presença ou não de incertezas no problema (U) e método de solução aplicado (SOLUTION). A classificação dos artigos de HLP é descrita nesta sessão de



Figura 2.4: Journals mais relevantes. (produzido pelo autor)

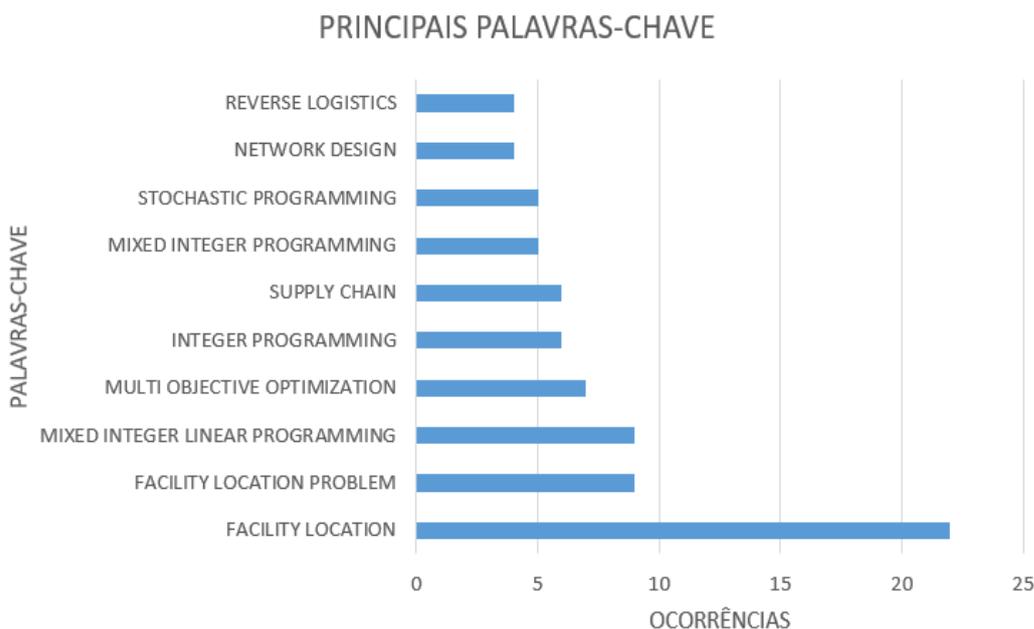


Figura 2.5: Palavras-chave mais relevantes. (produzido pelo autor)

forma separada apenas para efeito de organização e melhor identificação dos artigos pelos leitores, mas assim como na seção anterior, a análise e discussão dos resultados é feita em conjunto, na subseção seguinte. Nesta análise inicial, é interessante observar a predominância de estudos de casos realizados no Iran

Tabela 2.2: Estudos de caso HLP

CONTEXTO	CASE	REGIÃO	ARTIGO
TRANSPORT NETWORK	Shipping Company in Iran   Transportation goods	Iran	Mokhtarzadeh et al. (2021)
	China Railway Express   Multimodal Transport Network	China	Ma et al. (2020)
	Shangai (China)   Multimodal Transport Network	China	Ji et al. (2020)
	Latin American Country   Multimodal Transport Network	Latin America	Osorio-Mora et al. (2020)
	Air Express Company in China   Air-cargo scheduling	China	Zhang et al. (2017)
	HAZMAT Transportation network in Iran	Iran	Mohammadi, Jula et al. (2017)
	Transport Network in Iran	Iran	Mohammadi, Tavakkoli-Moghaddam et al. (2016)
SUPPLY CHAIN	Iran Sugar Industry   Bioethanol Supply Chain with Multimodal Transport Network	Iran	Saadati e Hosseini-zhad (2019)
POSTAL SERVICE	Postal Company in Iran	Iran	Mahmoodjanloo et al. (2020)
	Postal Company in Iran	Iran	Karimi e Setak (2018)

(6 trabalhos) e China (3 trabalhos).

Tabela 2.3: Classificação HLP

CONTEXTO	ARTIGO	PROBLEMA	FO	U	SOLUÇÃO
TRANSPORT NETWORK	Mokhtarzadeh et al. (2021)	MINLP	min COSTS   min Noise Pollution   min Social Impact	no	Meta-heuristic (population-based)
	Ma et al. (2020)	MIP	min COSTS	no	MIP (GUROBI)
	Ji et al. (2020)	MILP	min COSTS	no	Meta-heuristic (GA)
	Osorio-Mora et al. (2020)	MILP	min COSTS	no	MILP (GUROBI)
	Zhang et al. (2017)	MIP	min COSTS	no	CPLEX + Greedy Algorithm
	Mohammadi, Jula et al. (2017)	MINLP	min RISKS	yes	Meta-heuristic (population-based)
	Mohammadi, Tavakkoli-Moghaddam et al. (2016)	MINLP	min COSTS	yes	Evolutionary Algorithm + Game Theory
SUPPLY CHAIN	Saadati e Hosseini-zhad (2019)	MILP	min COSTS   min CO2 emission	no	MILP (CPLEX)
POSTAL SERVICE	Mahmoodjanloo et al. (2020)	MIP	max PROFIT	no	Meta-heuristic (population-based)
	Karimi e Setak (2018)	IP	min COSTS   max Flow derived	yes	IP (CPLEX)

Da mesma forma que o apresentado na Tabela (2.2), a seguir, são apresentadas as classificações quanto ao estudo de caso abordado em cada artigo de FLP. A Tabela (2.4) e a Tabela (2.5) apresentam, respectivamente, os estudos de caso e questões relativas a modelagem e resolução do problema para os contextos de *Bio Supply Chain* e *Supply Chain*. Assim como na classificação dos artigos que tratam de HLP, a classificação dos trabalhos de FLP é apresentada em tabelas separadas por contexto para melhor organização e entendimento pelo leitor. Nota-se a presença de um número grande de trabalhos com estudos de caso na área de design de cadeias de suprimentos. A divisão proposta nesta classificação destaca os artigos com foco em logística industrial, assim como os trabalhos que envolvem bioprodutos e bioenergia, como uma categoria de destaque dentre a seleção de artigos de *Supply Chain*. A princípio é possível observar uma predominância nos artigos de *Supply Chain* do uso de modelagem mista inteira linear (MILP) para resolução dos problemas propostos. No caso dos artigos de *Bio Supply Chain* é interessante ver que existe

uma variedade maior no foco das funções objetivo modeladas, apesar de todas de alguma forma envolverem a minimização dos custos.

Tabela 2.4: Estudos de Caso Bio Supply Chain e Supply Chain

CONTEXTO	CASE	REGIÃO	ARTIGO
Bio Supply Chain	Bioproducts Supply Chain - Arizona and New Mexico	USA	Zuniga Vazquez et al. (2021)
	Biomass Supply Chain network	Turkey	Gital Durmaz e Bilgen (2020)
	Bioenergy Supply Chain network	Iran	Mahjoub et al. (2020)
	Biomass Supply Chain network	Turkey	Akgil e Ulusam Seçkiner (2019)
	Supply chain network for a largescale biofuel industry (Tennessee)	USA	He-Lambert et al. (2018)
	Design of bioethanol green supply chain	France	Miret et al. (2016)
Supply Chain / Industrial Logistics	Regionalization and Network Optimization of White Crystal Sugar Traditional Market	Indonesia	Hidayat et al. (2021)
	Consolidation Centers in a Mexican factory   Shipping	Mexico	Martínez et al. (2020)
	Iran industry Supply network	Iran	Jouzdani et al. (2020)
	Poultry litter supply chain (Georgia)	USA	Zhao et al. (2020)
	Supply chain network (East Asia)	East Asia	Liu, Papageorgiou et al. (2020)
	Supply chain network in information and communications technology (ICT) industry	Iran	Vahdani e Ahmadzadeh (2019)
	Logistics in a clothing company	China	Liu, Xu et al. (2019)
	Network design of horticultural products	France	X. Tang et al. (2019)
	Laminated beech wood supply network	Austria	Kühle et al. (2019)
	Supply chain network design for a company in the food sector	Turkey	Aras e Bilge (2018)
	Total Hockey warehouses that supports both e-commerce and store shipments	USA	Millstein e Campbell (2018)
	Supply chain network through the construction of new DCs (Asia-Middle East region)	Asia	Kchaou Boujelben e Boulaksil (2018)
	Coal Supply Chain Network	China	Zhou e Li (2018)
	Supply chain network for a medium sized company	Europe	Chatzikontidou et al. (2017)
	Supply chain network and competitive model for a clothing companie	Turkey	Bilir et al. (2017)
	Company planning the locations of facilities in Jakarta	Indonesia	Ou-Yang e Ansari (2017)
	Halal Meat Supply Chain (HMSC) network (London - UK)	UK	Mohammed et al. (2017)
	Production and distribution planning in petroleum supply chains	Iran	Farahani e Rahmani (2017)
	French car manufacturer Renault supply chain network	France	Kchaou Boujelben, Gicquel et al. (2016)
	Distribution Network for Argos, retailer and distributor of UK consumer goods (UK)	UK	Ghadge et al. (2016)

Tabela 2.5: Classificação Bio Supply Chain e Supply Chain

CONTEXTO	ARTIGO	PROBLEMA	FO	U	SOLUÇÃO
Bio Supply Chain	Zuniga Vazquez et al. (2021)	MILP	min COST   min Environ.Impact   max Social Impact	yes	Benders Decomposition
	Gital Durmaz e Bilgen (2020)	MILP	max PROFIT   min DIST	no	MILP (CPLEX)
	Mahjoub et al. (2020)	MIP	max Production   min COST	no	-Constraint (CPLEX)
	Akgil e Ulusam Seçkiner (2019)	MILP	max Net present value (NPV)	no	MILP (GIS) + meta-heuristics
	He-Lambert et al. (2018)	MILP	max Net present value (NPV)	no	MILP (GAMS/CPLEX)
	Miret et al. (2016)	MILP	min COST   min Environmental COST   max JOBS	no	MILP (CPLEX)
Supply Chain / Industrial Logistics	Hidayat et al. (2021)	MILP	min COST	no	MILP
	Martínez et al. (2020)	MIP	min COST	no	MIP (GAMS/CPLEX)
	Jouzdani et al. (2020)	MILP	min COST	yes	MILP (LINGO)
	Zhao et al. (2020)	MILFP	max PROFIT   min CO2 Emissions	no	-Constraint (GAMS/CPLEX)
	Liu, Papageorgiou et al. (2020)	MILP	min COST	no	MILP (AIMMS)
	Vahdani e Ahmadzadeh (2019)	MINLP	max PROFIT	yes	Meta-heuristics (ICA) and (GA)
	Liu, Xu et al. (2019)	MINLP	min COST	no	Meta-heuristics (GA) + CPLEX
	X. Tang et al. (2019)	MILP	min COST	no	MILP (CPLEX)
	Kühle et al. (2019)	MILP	min COST	no	MILP (FICO Xpress)
	Aras e Bilge (2018)	MILP	min COST   minmax regret across scenarios	yes	MILP (CPLEX)
	Millstein e Campbell (2018)	MIP	max Net present value (NPV)	no	MIP (Solver Premium Platform with the large-scale LP/IP solver)
	Kchaou Boujelben e Boulaksil (2018)	MILP	max PROFIT	yes	MILP (CPLEX)
	Zhou e Li (2018)	MILP	min COST	yes	Bender decomposition + LR
	Chatzikontidou et al. (2017)	MILP	min COST	yes	MILP (GAMS/CPLEX)
	Bilir et al. (2017)	MILP	Max PROFIT   Max SALES	no	MILP (GAMS/CPLEX)
	Ou-Yang e Ansari (2017)	MIP	min DIST   min COST	no	Meta-Heuristics (PSO + TS)
	Mohammed et al. (2017)	MILP	min COST   max Production   max cap. utilization   max Return of Investment	yes	MILP (LINGO/Xpress)
	Farahani e Rahmani (2017)	MILP	max Net Present Value (NPV)	yes?	MILP (GAMS/CPLEX)
	Kchaou Boujelben, Gicquel et al. (2016)	MILP	min COST	no	MILP (CPLEX)
	Ghadge et al. (2016) Ghadge et al. (2016)	MILP	min COST   min DIST	yes	Simulation

A Tabela (2.6) e a Tabela (2.7) apresentam, respectivamente, os estudos de caso e questões relativas a modelagem e resolução do problema para os contextos de logística humanitária (Humanitarian Logistics) e transporte e logística urbana (Transport / City Logistics).

Tabela 2.6: Estudos de Caso Humanitarian Logistics e City Logistics

CONTEXTO	CASE	REGIÃO	ARTIGO
Humanitarian Logistics	Warning System for disaster prevention	USA	Goto e Murray (2020)
	Post-disaster emergency planning - Wenchuan earthquake	China	Wang, Situ et al. (2019)
	Relief network	Iran	Hasani e Mokhtari (2019)
	Humanitarian supply network - International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies	World	Charles et al. (2016)
	Reliable Facility Location Problem with Facility Protection (Human - China)	China	L. Tang et al. (2016)
	Prepare for earthquakes in Tehran	Iran	Bozorgi-Amiri e Khorsi (2016)
	Location and capacity allocations decisions to mitigate the impacts of disasters (Los Angeles)	USA	Paul e MacDonald (2016)
	Emergency logistics in Mountain Region of Rio de Janeiro	Brazil	Moreno et al. (2016)
Transport / City Logistics	City logistics center (Istanbul)	Turkey	Çakmak et al. (2021)
	Strategic hydrogen refuelingstation deployment plan	Korea	Kim et al. (2020)
	Location of fire stations in the Concepción province (Chile)	Chile	Rodriguez et al. (2020)
	Drones for deliveries on a Portland Metropolitan Area case study (Portland)	USA	Chauhan et al. (2019)
	Maintenance Location Routing of Netherlands Railways	Netherlands	Tonissen et al. (2019)
	Maintenance location routing of Netherlands Railways	Netherlands	Tönissen e Arts (2018)
	The battery charging station location problem (Hubei - China)	China	Guo et al. (2018)
	Urban Logistics Facility Location Shenzhen	China	Gan et al. (2018)
	Railway rapid transit network (Seville - Spain)	Spain	Canca e Barrena (2018)
	New Taipei City Public rental bike location and allocation	Taiwan	Yan et al. (2017)
	The location and allocation of fire service facilities (Harbin - China)	China	Wang, Liu et al. (2016)
	Maximum flow-covering location at Railway Network (Tokio)	Japan	Tanaka e Toriumi (2016)

Nesta classificação é possível observar a importância do contexto de logística humanitária nos estudos de casos propostos para problemas de localização nos últimos anos, com um número considerável de trabalhos nesta área. Da forma similar, os artigos com foco em problemas de transporte e logística urbana também aparecem em quantidade considerável; podendo-se ainda destacar a maior variação que esses artigos propõem nas funções objetivos, como os modelos de máxima cobertura por exemplo; ao contrário dos trabalhos de logística industrial que apresentam modelos com objetivos mais padronizados.

A Tabela (2.8) e a Tabela (2.9) apresentam, respectivamente, os estudos de caso e questões relativas a modelagem e resolução do problema para os contextos de logística reversa, de resíduos e reciclagem (Waste / Recycling / Reverse Logistics), serviços de saúde (Healthcare) e outras aplicações (Others).

É interessante observar, mesmo antes de uma análise mais detalhada, o número considerável de estudos de caso com problemas no sentido contrário de uma cadeia de suprimentos tradicional (*reverse*), que aqui engloba logística reversa, reciclagem e tratamento de resíduos; o que mostra a importância

Tabela 2.7: Classificação Humanitarian Logistics e City Logistics

CONTEXTO	ARTIGO	PROBLEMA	FO	U	SOLUÇÃO
Humanitarian Logistics	Goto e Murray (2020)	ILP	min Facilities	no	ILP(GUROBI)
	Wang, Situ et al. (2019)	MINLP	min COST   min DIST   max Survivors	no	Meta-heuristics (SA + PSO + beetle antennae search)
	Hasani e Mokhtari (2019)	MILP	min COST   min RISK   max coverage	yes	Meta-heuristic (GA + LS)
	Charles et al. (2016)	MILP	min COST	yes	MILP
	L. Tang et al. (2016)	IP	min COST	yes	LR + LS
	Bozorgi-Amiri e Khorsi (2016)	MIP	min TIME   min COST   minmax affected areas	yes	-Constraint (GAMS/CPLEX)
	Paul e MacDonald (2016)	MIP	min COST   min Fatalities	yes	heuristic (Evolutionary optimization algorithm)
Moreno et al. (2016)	MIP	min COST	yes	heuristic (time-decomposition fix-and-optimize)	
Transport / City Logistics	Çakmak et al. (2021)	IP	min DIST	no	Meta-heuristics
	Kim et al. (2020)	MIP	min Facilities   max coverage   min Travel Time	no	MIP (CPLEX)
	Rodriguez et al. (2020)	MILP	max coverage	no	Iterative Algorithm (Hypercube Queuing Model)
	Chauhan et al. (2019)	ILP	max coverage	no	Heuristic
	Tonissen et al. (2019)	MIP	min COST	yes	MIP (CPLEX)
	Tonissen e Arts (2018)	MIP	min COST	yes	MIP (CPLEX)
	Guo et al. (2018)	IP	min COST   max USERS	no	Iterative greedy heuristic
	Gan et al. (2018)	MIP	min COST	no	Meta-Heuristics (PSO)
	Canca e Barrena (2018)	MILP	min COST   min Trains   min DIST	no	Branch and Cut (GUROBI)   Meta-heuristics (GA)
	Yan et al. (2017)	MIP	min COST	yes	MIP (CPLEX) + heuristics
	Wang, Liu et al. (2016)	MINLP	maxCoverage	no	MINLP (GAMS/BARON)
Tanaka e Toriumi (2016)	IP	maxCoverage	no	IP (GUROBI)	

que estes problemas possuem atualmente e o quanto os modelos de localização/alocação são úteis neste contexto. Os problemas de cuidados na saúde também apresentam um número grande de trabalhos, com modelos propostos que apresentam grande variedade, também mostrando ser uma área de atuação importante nos últimos anos para problemas de localização.

Destacam-se ainda 4 artigos que não se enquadraram em nenhuma das categorias propostas de estudos de caso, e foram classificados no contexto "Outros". Dentre estes trabalhos, é interessante ressaltar o artigo de Teixeira et al. (2019), que apresenta o problema de design da rede de cortes de justiça em Portugal, um problema bem específico e com grandes diferenças em relação aos trabalhos em geral listados nesta revisão.

### 2.2.4

#### Análise e Discussão dos Resultados da RSL

O gráfico apresentado na Figura (2.5) mostra as principais palavras-chave utilizadas pelos autores na seleção de todos os 81 artigos, expondo um fato que é reafirmado na classificação dos estudos de caso apresentados pelos autores; o design e otimização de cadeias de suprimento (Supply Chain) é o contexto mais frequente de aplicação de problemas de localização, dos quais se destacam as cadeias de suprimento focadas em bioprodutos, como redes logísticas de produção e transporte de etanol e biomassa por exemplo,

Tabela 2.8: Estudos de Caso Waste, Healthcare e Outros

CONTEXTO	CASE	REGIÃO	ARTIGO
Waste / Recycling / Reverse Logistics	Locational strategy for recycling facilities of end-of-life photovoltaic modules in Zhejiang	China	Yu e Tong (2021)
	Recycling Plants in São Paulo	Brazil	Medrano-Gómez et al. (2020)
	Hazardous waste location	Turkey	Utku e Erol (2020)
	Locating e-waste collection sites in the Greater Vancouver region	Canada	Shi et al. (2020)
	Network design for reverse logistics of lithium-ion batteries	Sweden	Tadaros et al. (2020)
	Location of mixed municipal waste treatment facilities	Czech Rep.	Nevrlý et al. (2019)
	Waste treatment infrastructure planning	Czech Rep.	Šomplák et al. (2019)
	Solid waste in urban centers: A case study of Bilaspur city (India)	India	Rathore e Sarmah (2019)
	Hazardous waste locating-routing problem (Turkey)	Turkey	Aydemir-Karadag (2018)
	Reverse logistics network design (Santiago - Chile)	Chile	Banguera et al. (2018)
	Supply network for sustainable conversion of waste agricultural plastics	Scotland	Rentizelas et al. (2018)
Locations of waste transfer stations in urban centers: A case study on the city of Nashik (India)	India	Yadav et al. (2016)	
Healthcare	Northern Ireland Ambulance base service	N. Ireland	Peng et al. (2020)
	Blood distribution network (Istanbul)	Turkey	Kaya e Ozkok (2020)
	Long-term healthcare network (Montreal)	Canada	Intrevado et al. (2019)
	Allocating cancer treatment units (Rio de Janeiro)	Brazil	Vieira et al. (2019)
	Jordan Blood Bank Supply Chain	Jordan	Hamdan e Diabat (2019)
	Optimization for the Locations of Ambulances (Shanghai - China)	China	Liu, Yang et al. (2017)
	Pre-hospital Emergency Medical Service (New Taipei City - Taiwan)	Taiwan	Chen e Yu (2016)
	Indiana Veteran Affairs Care Networks	USA	Y. Li et al. (2016)
Location of low-cost blood collection and distribution centres	Thailand	Chaiwuttisak et al. (2016)	
Others	Location of courts of justice	Portugal	Teixeira et al. (2019)
	Design of hydrogen transmission pipeline networks	Germany	Weber e Papageorgiou (2018)
	A Facility Location Model for Air Pollution Detection (Rome)	Italy	Lancia et al. (2018)
	Large-Scale Water Transfer Networks (China)	China	Li e Zhou (2017)

Tabela 2.9: Classificação Waste, Healthcare a Outros

CONTEXTO	ARTIGO	PROBLEMA	FO	U	SOLUÇÃO
Waste / Recycling / Reverse Logistics	Yu e Tong (2021)	MILP	min COST	no	MILP
	Medrano-Gómez et al. (2020)	MILP	max Product Collection	no	MILP (CPLEX)
	Utku e Erol (2020)	MIP	min COST	no	MIP (GAMS/CPLEX)
	Shi et al. (2020)	IP	max Product Collection   min COST	no	Meta-heuristics (NSGA II + LS)
	Tadaros et al. (2020)	MIP	min COST	yes	MIP
	Nevrlý et al. (2019)	MINLP	min COST	no	MINLP(GAMS/CPLEX)
	Šomplák et al. (2019)	MILP	min COST   min Emissions	yes	Benders Decomposition + CPLEX
	Rathore e Sarmah (2019)	MIP	min COST	no	MIP (CPLEX)
	Aydemir-Karadag (2018)	MIP	max PROFIT	no	MIP (CPLEX)
	Banguera et al. (2018)	MILP	max PROFIT	no	MILP (GAMS/CPLEX)
	Rentizelas et al. (2018)	MILP	max Net present value (NPV)	no	MILP (GAMS)
Yadav et al. (2016)	MINLP	min COST	no	MINLP (KNITRO)	
Healthcare	Peng et al. (2020)	MIP	min COST	yes	branch-and-Benders-cut
	Kaya e Ozkok (2020)	MINLP	min COST	yes	Heuristic (SA)
	Intrevado et al. (2019)	MIP	min COST	no	MIP (CPLEX)
	Vieira et al. (2019)	IP	min DIST	no	IP(CPLEX)
	Hamdan e Diabat (2019)	MIP	min COST   min TIME   min Outdated Units	yes	MIP (GAMS/CPLEX)
	Liu, Yang et al. (2017)	ILP	max Coverage	yes	ILP (CPLEX)
	Chen e Yu (2016)	IP	min DIST	no	LR + Heuristic
	Y. Li et al. (2016)	IP	min COST   max satisfied requests	no	CPLEX + Heuristics
Chaiwuttisak et al. (2016)	ILP	min DIST	no	ILP (CPLEX)	
Others	Teixeira et al. (2019)	MIP	min Districts   max courts in districts   min TRAVEL TIME	yes	MIP (FICO Xpress)
	Weber e Papageorgiou (2018)	MILP	min COST	no	MILP (GAMS/CPLEX)
	Lancia et al. (2018)	MILP	max PROFIT	no	Meta-Heuristics (GA)   CPLEX
	Li e Zhou (2017)	MINLP	min COST	yes	MINLP (CPLEX) + LR

conforme apresentado nos artigos de Gital Durmaz e Bilgen (2020), Akgül e Ulusam Seçkiner (2019) e Miret et al. (2016). A seleção de artigos de Supply Chain apresenta uma outra tendência que também se observa na Figura (2.5), de palavras-chave, que é a modelagem mista inteira linear (MILP) como a

mais frequente nos artigos, utilizada em 19 dos 26 artigos com aplicação em cadeias de suprimentos. Da mesma forma, o método de solução mais utilizado é o solver comercial CPLEX, presente em 14 dos 26 artigos de supply chain. Os artigos de Vahdani e Ahmadzadeh (2019) e Liu, Xu et al. (2019) apresentam problemas de modelagem mista inteira não linear, que naturalmente são mais complexos para a resolução, o que justifica a escolha de ambos pela utilização de metaheurísticas, principalmente Algoritmos Genéticos (GA).

Outro contexto muito frequente na seleção realizada é o design de redes de transporte, principalmente nos artigos de Hub Location; mas também nos artigos de Facility Location, com destaque para localização de *hubs* multimodais de transporte e manutenção. Como em muitos dos problemas de transporte, o roteamento também é um aspecto importante. Existe também uma variação maior nos tipos de modelagem abordados, com mais problemas focados em programação inteira e métodos de resolução utilizando heurísticas e metaheurísticas. Os problemas de Hub Location contam ainda com dois artigos que abordam problemas de serviços postais, que podemos considerar na categoria de logística urbana, também muito presentes na seleção de artigos de FLP que, porém, apresentam maior variedade nesse contexto, como o artigo de Yan et al. (2017) que aborda o problema de localização e alocação de bicicletas públicas de aluguel em Taiwan, ou os artigos de Rodriguez et al. (2020) e Wang, Liu et al. (2016) que abordam o problema de localização de estações de bombeiros.

É interessante observar como a sustentabilidade está presente de forma considerável nos artigos de facility location nos últimos anos, tanto na forma de cadeias de suprimento de bio-produtos, conforme comentado anteriormente, quanto no contexto de problemas de reciclagem, logística reversa e logística de resíduos. O trabalho apresentado por Rentizelas et al. (2018), por exemplo, aborda o problema de localização na rede de conversão de resíduos plásticos agrícolas, um problema conectado com a atualidade mas que, em muitos casos, é abordado apenas de forma teórica, enquanto que neste caso, assim como em outros exemplos na seleção realizada, os autores aplicam na prática, com dados reais, as soluções propostas para lidar com o desafio da sustentabilidade e tratamento de resíduos. Assim como nos problemas de supply chain, nesse contexto a maioria dos artigos utilizam modelagem *MILP*, com solução pelo *CPLEX*, com um destaque também para os autores que utilizaram o ambiente de modelagem *GAMS*.

Dois contextos complementares que possivelmente serão muito desenvolvidos nos próximos anos, como reflexo da pandemia de COVID-19, são a logística humanitária e os serviços de cuidado à saúde (Healthcare), que no geral

abordam problemas de localização com uma ótica diferente. Observa-se que a modelagem de facility location é utilizada em problemas nas 4 fases de um desastre: mitigação, preparo, resposta e recuperação; com aplicações em diversas regiões do planeta, incluindo o trabalho de Charles et al. (2016) de desenvolvimento de uma rede de logística humanitária para a Cruz Vermelha que envolve todo o mundo, e não uma região específica apenas. De todos os contextos, estes são os únicos com a maioria dos artigos apresentando a consideração de incertezas nos cenários analisados, na modelagem ou nos dados utilizados (10 dos 17 artigos). Os métodos de solução propostos, no entanto, variam. No contexto da logística humanitária observa-se a predominância de trabalhos utilizando heurísticas e metaheurísticas, como buscas locais por exemplo, enquanto no contexto de healthcare, assim como em outros contextos, a predominância é de artigos utilizando um solver comercial, mesmo com a presença de incertezas no problema. Apesar de todos os contextos apresentados para classificação dos artigos conterem trabalhos que consideram a presença de incertezas, a maioria dos artigos ainda focam apenas na modelagem determinística para a solução dos estudos de caso propostos. É possível observar ainda que, mesmo nos contextos de logística humanitária e healthcare, assim como nos outros problemas, a função objetivo modelada visa minimizar os custos, com poucas exceções na seleção realizada.

A realização da Revisão Sistemática de literatura apresenta um ótimo material para consulta em problemas de localização aplicados em estudos de casos com dados reais, como o que será desenvolvido na presente pesquisa; porém, os resultados obtidos mostram também um *gap* na literatura, nos últimos 5 anos, de estudos de casos na aviação civil; que a presente dissertação visa cobrir. Na etapa de busca da literatura alguns artigos no contexto da aviação foram identificados, porém, eliminados nos filtros de seleção pois não apresentaram estudos de casos com dados reais; as modelagens propostas foram aplicadas em instâncias da literatura.

## 2.3

### **Modelo Estratégico de Localização-Alocação de pessoal**

Com o Gap identificado nos estudos de caso com aplicação de modelos de localização na aviação civil nos últimos anos, o modelo a ser desenvolvido nesta dissertação será baseado nos resultados mais frequentes apresentados na revisão de literatura. A maior parte dos estudos de caso apresentados possuem modelagem inteira ou mista, adaptados à cada problema desenvolvido, com o objetivo de minimizar os custos totais de determinada operação.

Definida a base do modelo, um ponto à ser adicionado é a alocação de

peçoal. Lim-Apo et al. (2021) apresenta um modelo operacional de alocação de inspetores, assim como ANAC (2019) também apresentam um modelo operacional na indústria da aviação civil, como foco em Safety Oversight.

Dessa forma, o modelo que une planejamento estratégico e operacional deve conter uma base de modelo de localização, com restrições referentes às operações. Assim como a função objetivo deve minimizar custos de localização e custos operacionais. A união desses dois problemas resulta em um quantidade grande de variáveis binárias, o que, segundo a revisão conduzida na sessão anterior, sugere a utilização de um solver comercial para a otimização do modelo.

## 3

### Estudo de Caso

Neste capítulo é descrito o problema a ser abordado, os principais desafios a serem solucionados e o estudo de caso proposto para desenvolvimento e aplicação do modelo matemático.

#### 3.1

##### Metodologia

O protocolo seguido ao longo do estudo de caso é dividido em 6 etapas, conforme segue:

- (i) Formulação do problema
- (ii) Levantamento de informações
- (iii) Descrição do problema
- (iv) Coleta de dados
- (v) Análise do Dataset
- (vi) Tratamento dos dados

O levantamento de informações e formulação do problema é realizado pela condução de entrevistas e reuniões com os funcionários da ANAC, para entender melhor o problema e reunir os dados necessários; como lista de funcionários, localização atual e capacitações dos mesmos, histórico de demanda, arcos de origem/destino e custos de transporte. Como o estudo possui foco estratégico para auxílio à tomada de decisão, o objetivo é trabalhar com um horizonte de 12 meses no modelo matemático, analisando a demanda mês a mês, de modo que o tomador de decisão só precise utilizar o programa anualmente, colocando como dados de entrada dados de demanda mensal planejados, e o modelo retornará o melhor conjunto de localização-alocação dos servidores.

Os dados coletados são validados em entrevistas com os gerentes das superintendências estudadas.

A modelagem matemática é inicialmente desenvolvida utilizando os conceitos apresentados no referencial teórico do presente trabalho e apenas nas

etapas mais avançadas do projeto é que as aplicações voltadas para o estudo de caso descrito nesta seção foram adicionadas. Ao longo de todo o projeto, novos encontros com membros da ANAC foram conduzidos para validação do dataset construído para o problema.

As etapas de descrição do problema, coleta de dados, análise do dataset e tratamento dos dados são apresentadas de forma mais aprofundada nas seções à seguir.

## 3.2

### Descrição do Problema

Conforme foi apresentado nas seções anteriores, o objetivo do presente trabalho é desenvolver um modelo estratégico de localização e alocação, através de um estudo de caso realizado na Agência Nacional de Aviação Civil do Brasil (ANAC).

A Agência Nacional de Aviação Civil foi instituída em 2005 e começou a atuar em 2006 com o objetivo de regular e fiscalizar as atividades da aviação civil e a infraestrutura aeronáutica e aeroportuária no Brasil. Seus servidores têm como atribuições a realização de inspeções. A agência realiza inspeções de pista, de aeronaves, cursos de aviação, estrutura dos centros de aviação, segurança e serviço prestado aos passageiros pelas empresas de transporte aéreo.

A estrutura da ANAC é dividida por superintendências. Cada superintendência possui servidores dedicados, que podem estar alocados na sede nacional, na cidade de Brasília, ou em sedes de representação regional, nas cidades de São Paulo e Rio de Janeiro, que constituem portanto as principais estruturas da agência. Existe ainda uma representação na cidade de São José dos Campos, responsável pela realização de cursos de formação. O Projeto de regionalização da ANAC, porém, possui o foco na distribuição dos servidores da agência responsáveis pela realização de inspeções nos núcleos localizados em diferentes estados do Brasil, denominados Núcleos Regionais de Aviação Civil (NURAC's). A Figura (3.1) ilustra como é formada a estrutura atual da agência.

As NURAC's possuem servidores com diferentes capacitações. O atendimento às demandas atualmente é realizado de forma pouco otimizada, com base em conhecimentos empíricos baseados nas experiências anteriores dos servidores e dos tomadores de decisão responsáveis pela alocação e localização desses funcionários. Para atender a uma demanda de fiscalização em um aeroporto sem representação regional, é necessário alocar um servidor capacitado que esteja localizado em uma Regional, ou sede, de outra cidade, e custear o



Figura 3.1: Rede de Núcleos Regionais da ANAC. (Relatório ANAC 2018)

transporte desse servidor para o destino demandado. O mesmo ocorre quando a demanda ocorre em uma cidade que possui Regional, ou sede, porém não possui um servidor capacitado para atender aquela demanda específica, o que obriga o tomador de decisão a custear o transporte de servidores de outros estados. Sem uma otimização para o projeto de regionalização, os custos operacionais para atender as demandas são muito maiores do que poderiam ser, além do risco de queda na qualidade do serviço prestado.

O problema envolve ainda outros fatores que também demandam uma melhor otimização, como por exemplo a questão do preço das passagens aéreas. Como os servidores são transportados por via aérea, não necessariamente um servidor localizado em uma Regional mais próxima ao nó de demanda representa a melhor opção financeira, visto que um arco mais distante pode ser mais econômico financeiramente e até mesmo em termos de tempo de viagem, o que também deve ser incorporado no problema de regionalização.

Dessa forma, o estudo de caso tem como foco otimizar a localização dos inspetores, de acordo com suas capacitações, na rede de Regionais e sedes da ANAC, e alocar esses servidores para atender as demandas regionais.

### 3.3 Coleta de Dados

O estudo de caso proposto envolve uma quantidade considerável de dados, que estão divididos em datasets de acordo com cada superintendência da

ANAC. Para entendermos melhor o levantamento de dados, é necessário antes entender como funcionam as superintendências da ANAC.

(i) SAS - Superintendência de Acompanhamento de Serviços Aéreos

Dentre outras atribuições, é responsável por compor administrativamente conflitos de interesses entre prestadoras de serviços, acompanhar o mercado de serviços aéreos públicos e satisfação dos usuários.

(ii) SAF - Superintendência de Administração e Finanças

Acompanha todas as atribuições relacionadas a assuntos financeiros e orçamentários da Agência.

(iii) SAR - Superintendência de Aeronavegabilidade

Responsável pela emissão de certificados de aeronavegabilidade e credenciamento de pessoas. Regula as atividades exercidas pelas Unidades Regionais em áreas técnicas.

(iv) SGP - Superintendência de Gestão de Pessoas

Responsável pelas atribuições de gestão de pessoas e Recursos Humanos da Agência e suas unidades organizacionais.

(v) SIA - Superintendência de Infraestrutura Aeroportuária

Opera e fiscaliza a infraestrutura da agência e serviços relacionados, inclusive de segurança em termos de estrutura em aeródromos civis.

(vi) SPI - Superintendência de Planejamento Institucional

Formula e apoia a implementação de ações voltadas ao fortalecimento institucional da Agência. Coordena o cumprimento de políticas, metas e projetos estabelecidos; além de orientar e supervisionar o planejamento estratégico da Agência.

(vii) SRA - Superintendência de Regulação Econômica de Aeroportos

Responsável por toda a parte de regulação, que inclui dentre outras funções a outorga de autorização e concessão para exploração de aeródromos civis públicos.

(viii) SRI - Superintendência de Relações Internacionais

Dentre outras funções, a SRI é responsável por todas as decisões relativas a Relações Internacionais da Agência, como acordos, tratados e convenções relativos ao transporte aéreo internacional, além de realizar estudos e implementar recomendações internacionais de aviação civil.

## (ix) SPO - Superintendência de Padrões Operacionais

É uma das superintendências mais envolvidas no estudo de caso proposto neste trabalho, pois é responsável por todos os padrões operacionais da Agência relacionados à certificação e fiscalização de operadores aéreos, operações aéreas, treinamento de tripulantes, emissão de certificados médicos, avaliação das aeronaves, dentre outros. Propõe também a atualização dos padrões vigentes com base na evolução da tecnologia aeronáutica.

## (x) STI - Superintendência de Tecnologia da Informação

Responsável pela administração dos recursos de Tecnologia da Informação da Agência e inovação, dando suporte às demais áreas.

## (xi) SFI - Superintendência de Ação Fiscal

Planeja e executa as ações fiscais da ANAC, ou seja, junto com a SPO, é uma das superintendências mais envolvidas no presente estudo de caso, visto que é responsável por coordenar as ações fiscais além de administrar a Unidades Regionais da Agência.

## (xii) SPL - Superintendência de Pessoal da Aviação Civil

Certifica e fiscaliza organizações de instrução e treinamento, além de promover estudos sobre padrões relacionados a saúde, ergonomia e proficiência linguística dos tripulantes.

Com o objetivo de trabalhar com servidores de diferentes áreas, que de alguma forma estivessem voltadas para o problema descrito, realizou-se uma triangulação de dados entre 4 superintendências: SPO, SFI, SIA e SAR.

Foram amostrados dados de demanda de cada uma das 4 superintendências citadas. Como cada superintendência lida com diferentes demandas de fiscalização, foi realizado um pré-tratamento de codificação dessas demandas, através de uma tabela de inspeções realizadas por cada superintendência, duração de cada atividade, quantidade de servidores necessários para realizar a atividade, e quais servidores possuem capacitação para cada atividade. Além desses dados, também foram coletados todos os arcos de viagem possíveis (entre regionais (origem) e aeroportos (destino), seus custos e tempo de transporte. Como se trata de uma amostragem da série histórica, os dados de demanda foram extrapolados para geração do dataset de 12 meses que será utilizado no modelo. Ou seja, os dados de demanda não representam 1 ano completo da ANAC, porém, possuem dimensão similar baseada em amostragem validada nas entrevistas com funcionários da ANAC.

Uma das características mais importantes do problema descrito é a capacitação dos funcionários, ou seja, não podemos considerar que todos os servidores disponíveis são iguais, pois eles possuem capacitações diferentes para atendimento às demandas, ou seja, o modelo matemático à ser proposto precisa lidar não apenas com os arcos de viagem, mas também com a individualidade de cada servidor, o que aumenta consideravelmente o número de dados.

### 3.4

#### Análise do dataset

Na Seção 3.2 do presente trabalho foi descrito o processo de coleta dos dados com a ANAC para o estudo de caso apresentado. Esses dados, porém, não constituem o dataset final para o modelo, que deve ser preparado por meio de um processo de tratamento de dados. A primeira etapa consiste na melhor organização desses dados, ou seja, dispor os dados, que foram coletados de forma separada, em um dataset principal único. Esse dataset é composto pelo nome dos servidores e suas capacitações, arcos de viagem possíveis entre regionais e aeroportos, assim como os custos e tempo de deslocamento dessas viagens, tabela de demandas da ANAC no ano, com as atividades demandadas, local da atividade e mês de cada demanda, custo operacional das agências, equipe necessária e tempo gasto para cada atividade de demanda possível e disponibilidade de cada servidor.

TABELA DE DEMANDA DE INSPEÇÕES				
PERÍODO	MISSÃO	ATIVIDADE	AEROPORTO	SUPERINTENDÊNCIA
1	1	A5	SBGR	SFI
1	2	A6	SBGR	SFI

Figura 3.2: Exemplo Dataset: Demandas (Produzido pelo autor)

A Figura 3.2 exemplifica como é disposta a tabela de demanda de inspeções no dataset do modelo. O período refere-se ao mês no qual ocorre a demanda por uma determinada inspeção, como no exemplo, a inspeção A5 (código para a atividade real), que é demandada no mês 01 (janeiro), no aeroporto SBGR (código para o Aeroporto Governador André Franco Montoro, conhecido como Aeroporto de Guarulhos, localizado em Guarulhos-SP). Como facilitação para o modelo, cada demanda recebe um código numérico, denominado Número da Missão, de forma que cada conjunto de demanda (período, atividade, aeroporto) possa ser representado por apenas um número. A tabela mostra ainda a superintendência que demandou a inspeção.

Cada atividade de inspeção demanda uma certa quantidade de funcionários em equipe para sua realização, além de um intervalo de tempo, conforme mostra a Figura 3.3

ATIVIDADE	DURAÇÃO	EQUIPE
A1	2	1
A2	2	1
A3	1	1
A4	3	1
A5	4	1
A6	3	1

Figura 3.3: Exemplo Dataset: Atividades (Produzido pelo autor)

No exemplo citado, a atividade A5, demandada em SBGR, necessita de apenas um servidor alocado na equipe, porém, leva 4 dias para ser realizada.

Como explicado anteriormente, não é qualquer servidor que pode atender à qualquer demanda de inspeção, visto que essas atividades necessitam de capacitações diferentes, sendo este, um dos pontos principais do modelo matemático aplicado à este estudo de caso. A Figura 3.4 mostra todas as capacitações que o servidor hipotético A.M.O possui.

SERVIDOR	CAPACITAÇÃO
A.M.O	A2
A.M.O	A4
A.M.O	A5
A.M.O	A7
A.M.O	A10
A.M.O	A25

Figura 3.4: Exemplo Dataset: Capacitações (Produzido pelo autor)

É possível observar que, dentre outras habilidades, o servidor A.M.O possui a capacitação necessária para atender a demanda por inspeção A5. A otimização busca não apenas localizar os servidores e agências da ANAC, mas também, entender o perfil de capacitação necessária em cada agência, e a melhor forma de alocar esses servidores, de forma a minimizar os custos e melhorar o atendimento às demandas de inspeção.

Tendo em vista o objetivo proposto pela ANAC, um dos principais pontos de estudo é o custo envolvido nas viagens, ou seja, o quanto a Agência gasta para que os servidores sejam transportados das regionais de origem para cada destino de demanda. A Figura 3.5 exemplifica alguns custos e tempos de

viagem gastos em arcos reais existentes envolvendo o Aeroporto de Guarulhos como destino.

ORIGEM	DESTINO	CUSTO	TEMPO
AM	SBGR	648,5	0,5
BA	SBGR	278	0,5
CE	SBGR	425	0,5
DF	SBGR	295	0,5

Figura 3.5: Exemplo Dataset: Viagens (Produzido pelo autor)

Essa análise ajuda a compreender o problema e entender como solucioná-lo; ajuda também a dimensionar a quantidade de variáveis envolvidas no processo. Considerando o horizonte proposto como objetivo (demanda anual - 12 meses), a quantidade de arcos envolvendo todos os aeroportos do Brasil disponíveis para inspeções da ANAC (100 destinos) e todas as regionais de origem (16 estados brasileiros), todos os inspetores localizados nessas regionais (174 servidores) além de seus conjuntos únicos de capacitações, tornam a modelagem inteira proposta complexa e com grande custo computacional.

Para auxiliar a eficácia do modelo, foi realizado um pré-tratamento dos dados para gerar previamente os conjuntos a serem utilizados no modelo, com todas as combinações possíveis entre servidores, capacitações, origens e destinos e assim gerar os datasets de entrada para o modelo matemático já com os dados tratados. Esse processo será detalhado na Seção 4.1 do presente trabalho.

## 4

# Tratamento dos Dados e Formulação Matemática

Este capítulo apresenta o algoritmo de tratamento dos dados desenvolvido para geração dos conjuntos e variáveis do modelo para melhorar sua performance e em seguida descreve a formulação matemática do modelo de otimização proposto.

### 4.1

#### Tratamento dos Dados

Nesta seção serão apresentados os pseudo códigos que descrevem o algoritmo de tratamento dos dados desenvolvido na pesquisa. A Tabela (4.1) mostra os conjuntos do modelo e a Tabela (4.2) apresenta os parâmetros de entrada e saída do algoritmo.

Tabela 4.1: Índices do modelo

Sets	Índices	Domínio	Descrição
Pessoas (P)	p	{1,...,P}	Conjunto de pessoas (servidores)
Origens (O)	o	{1,...,O}	Conjunto de origens
Destinos (D)	d	{1,...,D}	Conjunto de destinos
Tempo (T)	t	{1,...,T}	Conjunto de meses do horizonte de planejamento
Atividades (A)	a	{1,...,A}	Conjunto de atividades (demandas de inspeção)

O algoritmo de geração do conjunto de variáveis tem como objetivo retirar do modelo principal uma etapa fundamental do processo, que é o tratamento dos dados, para ter uma análise mais focada no problema visando reduzir o tempo de processamento. O modelo estratégico proposto neste trabalho, apesar de considerar a parte de alocação dos servidores, é um modelo para ser rodado poucas vezes, de modo que o tempo de execução não é um dos principais problemas; porém, ainda assim, é necessário melhorar a performance do modelo, de forma que a resolução esteja disponível em um tempo viável de execução. O código de geração de variáveis tem como objetivo gerar 3

Tabela 4.2: Parâmetros do algoritmo de tratamento dos dados

Parâmetros	Descrição
$DEM_{adkt}$	[1] se existir demanda para a atividade (a), no destino (d), mês (t) e capacitação k; [0] caso contrário.
$CAP_{pk}$	[1] caso o servidor p possua a capacitação k; [0] caso contrário.
$CA_{pk}$	[1] caso o servidor p tenha a capacitação ativa k; [0] caso contrário.
$DA_d$	[1] se o destino d estiver ativo; [0] caso contrário.
$PODT_{podt}$	[1] caso o servidor (p) possa viajar da origem (o) para o destino (d) no tempo (t); (0) caso contrário.
$PODTA_{podta}$	[1] caso o servidor (p) possa viajar da origem (o) para o destino (d) no tempo (t) para realizar a atividade (a); [0] caso contrário.

conjuntos de combinações de dados à partir do dataset original do modelo: um conjunto com todas as combinações de servidores-destinos-atividades, denominado PDA, utilizado nas restrições do modelo; o conjunto de geração da variável x (PODT), e o conjunto da variável y (PODTA).

O Algoritmo 1 é responsável por filtrar os destinos possíveis, de forma que o programa percorre o dataset de destinos das demandas ( $DEM[i,2]$  representa a coluna [2] de DEM) e salva em um vetor apenas aqueles destinos nos quais ao menos uma demanda existe, denominados Destinos Ativos.

---

**Algorithm 1** FiltraDestinos( $d, DEM_{a,d,k,t}$ )
 

---

```

 $DA_d \leftarrow \{ \}$ 
for  $i \in 1 \rightarrow I$  do
  for  $d \in D$  do
    if  $DEM[i, 2] = d$  then
       $DA_d \leftarrow DA_d \cup d$ 
    end if
  end for
end for
Filtra Unique DA
Retorna DA

```

---

O Algoritmo 2 funciona de forma similar ao primeiro, porém para filtrar e reduzir a quantidade de capacidades dos servidores. Assim como no Algoritmo 1, o programa percorre as atividades demandadas, salvando todas que apareçam ao menos uma vez no dataset em um vetor denominado Capacidades Ativas. Cada iteração do algoritmo percorre  $CAP[i,1]$  (coluna 1 que representa os servidores) e  $CAP[i,2]$  (coluna 2, com as capacitações dos servidores), e compara com  $DEM[i,3]$  (coluna 3, com as atividades demandadas).

Dessa forma, apenas as capacitações de atividades demandadas são salvas em CA (capacitações ativas).

---

**Algorithm 2** FiltraCapacitações( $CAP(p,k),DEM(a,d,k,t)$ )
 

---

```

CA ← {}
for  $i \in 1 \rightarrow I$  do
  cap ← CAP( $i, 2$ )
  p ← CAP( $i, 1$ )
  k ← DEM( $i, 3$ )
  if  $k = cap$  then
    CA( $p, k$ ) ← ( $p, k$ )
  end if
end for
Filtra Unique CA
Retorna CA( $p,k$ )

```

---

Os demais algoritmos são responsáveis por gerar as combinações de conjuntos para o modelo principal da dissertação. O Algoritmo 3 gera as combinações de PODT, salvando em um vetor que será passado para o modelo matemático como conjunto da variável "x", lendo os dados de meses, origens, destinos ativos (filtrados no Algoritmo 1) e servidores do dataset.

---

**Algorithm 3** Pseudocódigo PODT
 

---

```

PODT ← {}
for  $t \in T$  do
  for  $o \in O$  do
    for  $d \in DA$  do
      for  $p \in P$  do
        PODT ← ( $p, o, d, t$ )
      end for
    end for
  end for
end for
Retorna PODT( $p,o,d,t$ )

```

---

O Algoritmo 4 gera as combinações de PODTA, que formam o conjunto da variável "y" no modelo matemático. O Programa percorre o vetor de PODT gerado no Algoritmo 3, assim como o vetor de Capacidades Ativas (gerado no Algoritmo 2), de forma que os dados de servidores, origens, destinos ativos, meses e capacidades ativas são salvos no vetor PODTA.

As combinações PODT e PODTA são então exportadas dos algoritmos para o código do modelo matemático, condicionando a criação das variáveis  $x_{podt}$  e  $y_{podta}$ , conforme será apresentado na próxima Seção da dissertação.

**Algorithm 4** Pseudocódigo PODTA

---

```

PODTA ← {}
for i ∈ 1 → I do
  for j ∈ 1 → J do
    for n ∈ 1 → N do
      if (PODT[i, 1] = CAP[j, 1]) & (CA[j, 2] =
DEM[n, 3]) & (PODT[i, 3] = DEM[n, 2]) & (PODT[i, 4] = DEM[n, 4])
then
      pes ← PODT[i, 1]
      o ← PODT[i, 2]
      des ← PODT[i, 3]
      t ← PODT[i, 4]
      aa ← DEM[n, 1]
      PODTA ← (pes, o, des, t, aa)
    end if
  end for
end for
end for
end for

```

Retorna PODTA(pes,o,des,t,aa)

---

**4.2****Formulação Matemática**

Nesta seção serão apresentados os parâmetros e variáveis do modelo de otimização e a formulação matemática do problema será descrita.

A Tabela (4.3) apresenta a descrição de cada parâmetro: (Custos, Demanda, Disponibilidade e Custos de tempo). Um parâmetro fundamental à ser descrito é a capacitação dos servidores, que não aparece diretamente no modelo matemático, e por isso não é apresentado na tabela de parâmetros; porém, é o parâmetro condicional utilizado para gerar as variáveis, conforme descrito na seção anterior.

Tabela 4.3: Parâmetros do modelo

Parâmetros	Descrição
CUSTO.OP <sub>o</sub>	Custo operacional de uma instalação regional em "o"
CUSTO.TRANSPO <sub>od</sub>	Custo de transporte no arco origem-destino
DEMANDA <sub>dta</sub>	Demanda "a" a ser atendida em "d" no mês "t"
DISP <sub>pt</sub>	Disponibilidade mensal dos servidores "p"
M <sub>a</sub>	Tempo gasto para atender cada inspeção "a"
T.TRANSPO <sub>od</sub>	Tempo de transporte no arco origem-destino

A Tabela (4.4) apresenta as variáveis do modelo e a descrição de cada variável binária. A geração dessas variáveis está condicionada aos algoritmos

de geração descritos na seção anterior, ou seja, as variáveis "x" e "y" só são criadas se existe a combinação "podt" e "podta", respectivamente, geradas pelo algoritmo de tratamento dos dados.

Tabela 4.4: Variáveis do modelo

Variváveis	Descrição
$x_{podt} \in \{0, 1\}$ $PODT \neq 0$	1 se o servidor p é alocado ao arco origem-destino o-d, no tempo t; 0 caso contrário
$y_{podta} \in \{0, 1\}$ $PODTA \neq 0$	1 se o servidor p é alocado ao arco origem-destino o-d, para atender a tarefa a, no tempo t; 0 caso contrário
$z_{po} \in \{0, 1\}$	1 se o servidor p é alocado na origem o; 0 caso contrário
$w_o \in \{0, 1\}$	1 se uma regional é aberta na origem o; 0 caso contrário

A equação (4-1) é a função objetivo do modelo, que visa minimizar os custos totais de transporte e operação.

$$FO = MIN \sum_{podt} 2 CUSTO.TRANSPOd x_{podt} + \sum_o CUSTO.OP_o w_o \quad (4-1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{pod} y_{podta} = DEMANDA_{dta}; \forall(dta) \quad (4-2)$$

$$\sum_{oda} M_a y_{podta} + \sum_{od} 2 T.TRANSPOd x_{podt} \leq DISP_{pt}; \forall(pt) \quad (4-3)$$

$$x_{podt} \geq y_{podta}; \forall(podta) \quad (4-4)$$

$$z_{po} \geq x_{podt}; \forall(podt) \quad (4-5)$$

$$\sum_o z_{po} \leq 1; \forall(p) \quad (4-6)$$

$$w_o \geq z_{po}; \forall(po) \quad (4-7)$$

A equação (4-2) garante que toda a demanda de atividades será atendida. A equação (4-3) é a restrição de disponibilidade de horas de trabalho dos servidores, que garante que o tempo utilizado para transporte nas viagens selecionadas mais o tempo gasto atendendo as demandas não ultrapassarão a disponibilidade em dias de cada servidor. A equação (4-4) garante que um servidor só pode ser alocado para atender uma demanda no nó de destino se este servidor estiver neste destino. A equação (4-5) garante que um servidor só pode realizar uma viagem partindo de um nó de origem se ele estiver localizado nesta origem. A equação (4-6) é a restrição de localização dos servidores,

que garante que cada servidor só pode ser localizado em uma única origem. A equação (4-7) garante que um servidor só pode ser localizado em uma determinada origem caso uma instalação regional seja aberta nesta origem.

## 5 Resultados e Discussão

Neste capítulo, os resultados obtidos na pesquisa serão apresentados e discutidos. A Seção 5.1, descreve os resultados computacionais obtidos pelo modelo, através dos testes realizados utilizando a linguagem Julia. A Seção 5.2, descreve o resultado obtido com o estudo de caso proposto pela ANAC. A Seção 5.3 apresenta os cenários de análise de sensibilidade do modelo, para testar seus limites e flexibilidade.

### 5.1 Resultados Computacionais

O primeiro teste realizado com o modelo foi realizado com o Solver GLPK, disponível gratuitamente no Julia JuMP; o dataset utilizado para esse teste foi restrito à superintendência SPO, ou seja, considerando apenas os funcionários, demandas e agências da SPO (que são as sedes da ANAC: Brasília, Rio de Janeiro e São Paulo). Esse teste visou apenas localizar e alocar os funcionários em 3 possíveis origens, para atender as demandas da SPO (um dataset reduzido em relação ao completo). O Teste foi realizado ainda considerando apenas um período (mês 01), conforme descrito na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Resultados Computacionais: Teste 1

<b>Entrada</b>	<b>Conjunto</b>
Solver	Gratuito (GLPK)
Superintendência	SPO
Origens	SP, RJ, DF
Período	1 mês
RESULTADO	inviável

O modelo não conseguiu achar uma solução ótima para o problema; porém, esse teste foi importante para entender que um algoritmo de tratamento do dataset era fundamental. Além disso, a utilização de um solver comercial de fato se mostrou necessária, com a grande quantidade de variáveis inteiras e soluções possíveis, para tornar o modelo viável.

O Teste 2 foi realizado com os mesmos dados do Teste 1, porém, aplicando os procedimentos de tratamento de dados apresentados no Capítulo

4 e utilizando o Solver comercial Gurobi, também na plataforma JuMP da linguagem Julia, conforme a Tabela 5.2.

Tabela 5.2: Resultados Computacionais: Teste 2

<b>Entrada</b>	<b>Conjunto</b>
Solver	Gurobi
Superintendência	SPO
Origens	SP, RJ, DF
Período	1 mês
RESULTADO	TEMPO: 20s

O modelo inviável do Teste 1, se tornou um modelo com apenas 20 segundos de processamento no teste 2.

O teste 3 foi o primeiro a utilizar o dataset original, com todas as superintendências, porém, considerando apenas um período, ou seja, um mês de dados de demanda. Vale destacar que a quantidade de períodos (no caso do nosso estudo de casos, meses) faz muita diferença na quantidade de variáveis no modelo, pois interfere não apenas no número de atividades, mas também na quantidade de destinos e capacitações possíveis (conforme descrito no algoritmo de pré tratamento dos dados, no capítulo 4), por isso, esses primeiros testes com apenas um período são importantes para entender os resultados computacionais. O Teste 3 está descrito na Tabela 5.3.

Tabela 5.3: Resultados Computacionais: Teste 3

<b>Entrada</b>	<b>Conjunto</b>
Solver	Gurobi
Superintendências	Completo
Origens	AM, BA, CE, DF, ES, MG, MS, MT, PA, PE, PR, RJ, RN, RO, RS, SP
Período	1 mês
Nº Variáveis	95232
RESULTADO	TEMPO: 57,84s

Vale salientar a diferença entre a quantidade de variáveis com o tratamento de dados (95232 variáveis) e sem o tratamento (37.865.358 variáveis), isso para apenas um mês de dados. A variável "x" varia em  $278400T$ , onde "T" é a quantidade de meses; enquanto a variável "y" varia em  $37.584.000T$ . Os testes subsequentes mantêm o mesmo dataset do Teste 3, porém, com o modelo multiperíodo. O Teste 4 foi o primeiro a lidar com mais de um período (3 meses de demanda da ANAC), conforme descrito na Tabela 5.4.

É importante salientar alguns pontos importantes na comparação entre os resultados computacionais do teste com 1 mês e do teste com 3 meses;

Tabela 5.4: Resultados Computacionais: Teste 4

<b>Entrada</b>	<b>Conjunto</b>
Solver	Gurobi
Superintendências	Completo
Origens	AM, BA, CE, DF, ES, MG, MS, MT, PA, PE, PR, RJ, RN, RO, RS, SP
Período	3 meses
Nº Variáveis	232368
RESULTADO	TEMPO: 104,28s

dentre eles, o fato que, apesar do triplo de períodos (3 meses), o número de variáveis não triplica. Esse ponto é fundamental para o avanço do trabalho, pois mostra que a solução construída para melhoria de performance do modelo (pré tratamento + modelagem), também se expande com o crescimento do dataset; ou seja, mesmo para datasets mais robustos, a influência das soluções de otimização propostas para reduzir o número de variáveis continua presente. Como foi mostrado na seção de revisão de literatura, problemas de programação inteira são desafiadores do ponto de vista computacional, pois o número de variáveis pode crescer muito com o aumento de alguns dados no dataset. Vale destacar também o fato de a demanda não ser uniforme ao longo dos meses, logo, alguns meses terão uma demanda maior e, conseqüentemente, maior impacto no número de variáveis e no tempo de processamento.

O tempo de processamento obtido no modelo multi período também chama a atenção; apenas 104 segundos, em um modelo de programação inteira, com 3 meses de dados. É evidente, porém, que o tempo de processamento ser bom ou ruim é determinado pelo tomador de decisão; por exemplo, um modelo operacional, que precisa ser rodado com frequência, depende muito do tempo de processamento ser baixo (alguns segundos); o nosso modelo não têm o objetivo de chegar à esse ponto, porém, vale destacar que a natureza operacional também está presente no modelo, visto que a alocação dos servidores é intrínseca ao problema. Ou seja, a análise dos resultados aqui disposta deve sempre ser realizada dentro de um contexto de aplicação para a tomada de decisão, o simples resultado por si só não pode ser avaliado como bom ou ruim, rápido ou lento, mas sim, razoável ou não razoável; e dentro do razoável, para o estudo de caso proposto aqui, podemos concluir que é um bom tempo de processamento para o modelo.

O Teste 5 repete o dataset descrito nos testes anteriores, porém, agora com o intervalo de demanda de 6 meses, conforme descrito na Tabela 5.5.

Aqui já é possível observar um aumento considerável no tempo de processamento e no número de variáveis, como o esperado, porém, ainda

Tabela 5.5: Resultados Computacionais: Teste 5

<b>Entrada</b>	<b>Conjunto</b>
Solver	Gurobi
Superintendências	Completo
Origens	AM, BA, CE, DF, ES, MG, MS, MT, PA, PE, PR, RJ, RN, RO, RS, SP
Período	6 meses
Nº Variáveis	558624
RESULTADO	TEMPO: 242,37s

com grande influência da otimização de pré-processamento, que torna viável o modelo.

O Teste 6 mantém o *modus operandi* dos testes anteriores, porém, com os dados completos da ANAC, 12 meses de demanda real, conforme o descrito na Tabela 5.6.

Tabela 5.6: Resultados Computacionais: Teste 6

<b>Entrada</b>	<b>Conjunto</b>
Solver	Gurobi
Superintendências	Completo
Origens	AM, BA, CE, DF, ES, MG, MS, MT, PA, PE, PR, RJ, RN, RO, RS, SP
Período	12 meses
Nº Variáveis	1114448
RESULTADO	TEMPO: 504,97s

Todos os testes com resultados viáveis chegaram ao valor ótimo. Novamente, vale destacar a redução na quantidade de variáveis que o algoritmo de tratamento de dados promove. Com o tratamento, o modelo lida com 1.114.448 variáveis; enquanto que, sem o tratamento, seriam criadas 454.351.758 variáveis.

A Figura 5.1 mostra a evolução do número de variáveis ao longo do aumento na quantidade de meses considerada no horizonte de tempo, enquanto a Figura 5.2 mostra o aumento no tempo de processamento.

Ambos os gráficos possuem um comportamento semelhante, de crescimento próximo do constante, conforme ocorre o aumento do número de períodos; o que, de fato, é um grande resultado, visto que o esperado seria um crescimento exponencial. O fato desse comportamento exponencial não ocorrer pode ser explicado pelas soluções encontradas no algoritmo de pré-processamento para filtrar a geração de variáveis e conjuntos no modelo.

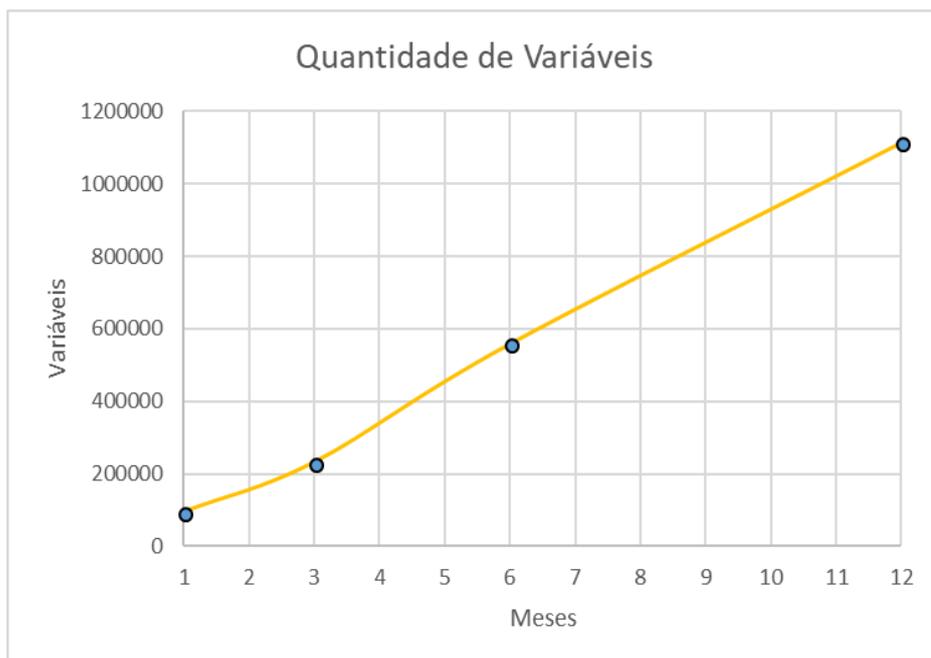


Figura 5.1: Gráfico da quantidade de variáveis

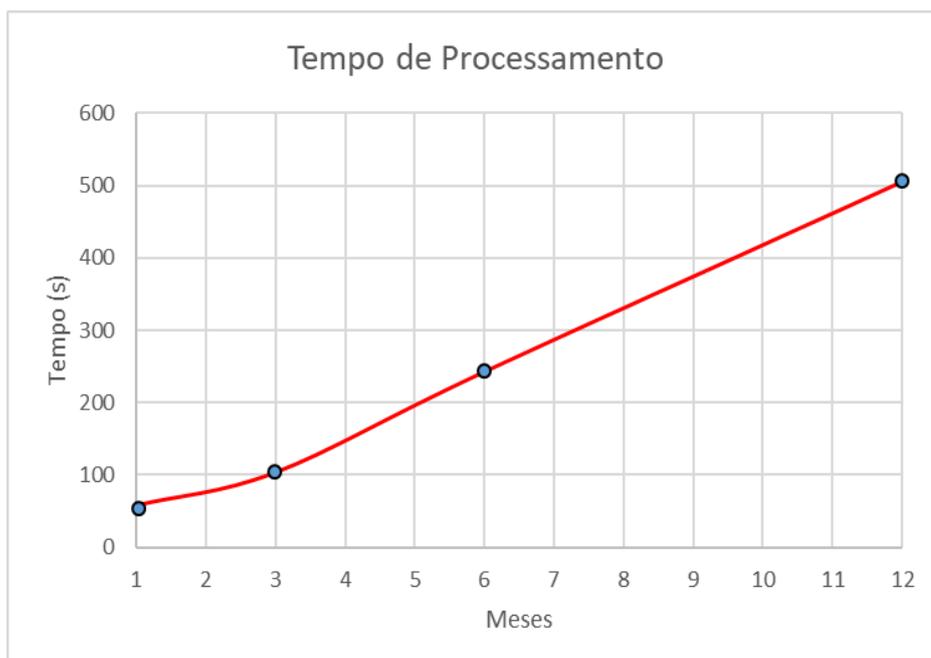


Figura 5.2: Gráfico do tempo de processamento

PUC-Rio - Certificação Digital N° 2012260/CA

## 5.2

### Resultado do Estudo de Caso

Nesta Seção serão apresentados os resultados obtidos no estudo de caso, com a análise da distribuição dos servidores pelas agências da ANAC, assim como as agências regionais abertas ou fechadas pelo modelo. Os resultados

de alocação obtidos nos testes com 1 mês, 3 meses e 6 meses de horizonte de tempo são apresentados no Apêndice A.

A Tabela 5.7 apresenta os resultados do Teste 6, com 12 meses de cobertura de demanda. A Figura 5.3 mostra a distribuição regional do Teste 6. Os estados de São Paulo, com 8 servidores, Ceará e Amazonas, com 7 servidores, Pernambuco e Paraná, com 6 servidores, apresentam a maior parte dos servidores, o que demonstra uma boa distribuição espacial das agências e seus servidores. É importante relembrar aqui que a otimização leva em conta não apenas a distribuição espacial dos servidores nas regionais, mas também, a distribuição de demandas e as capacidades dos servidores para atender à essas demandas.

Tabela 5.7: Resultados: Teste 6

<b>Regional</b>	<b>Servidores</b>
AM	7
BA	2
CE	7
DF	1
ES	2
MG	4
MS	4
MT	1
PA	3
PE	6
PR	6
RJ	4
RN	0
RO	0
RS	4
SP	8
TOTAL ALOCADOS	59
TOTAL NÃO ALOCADOS	115
TOTAL	174

A Figura 5.4 e a Figura 5.5 descrevem a quantidade de servidores por Região do Brasil, o que nos ajuda a entender melhor como esses servidores estão distribuídos pelo país. A Figura 5.4 traz visualmente a divisão por região, enquanto que a Figura 5.5 traz um gráfico de porcentagem de servidores e demanda por região em relação ao total alocado. Vale destacar ainda que apenas 59 dos 174 servidores foram alocados neste teste, o que significa apenas 34% do total.

A lógica esperada era realmente de uma predominância de servidores na região Sudeste, como ocorre no resultado apresentado, com 31% dos servidores.

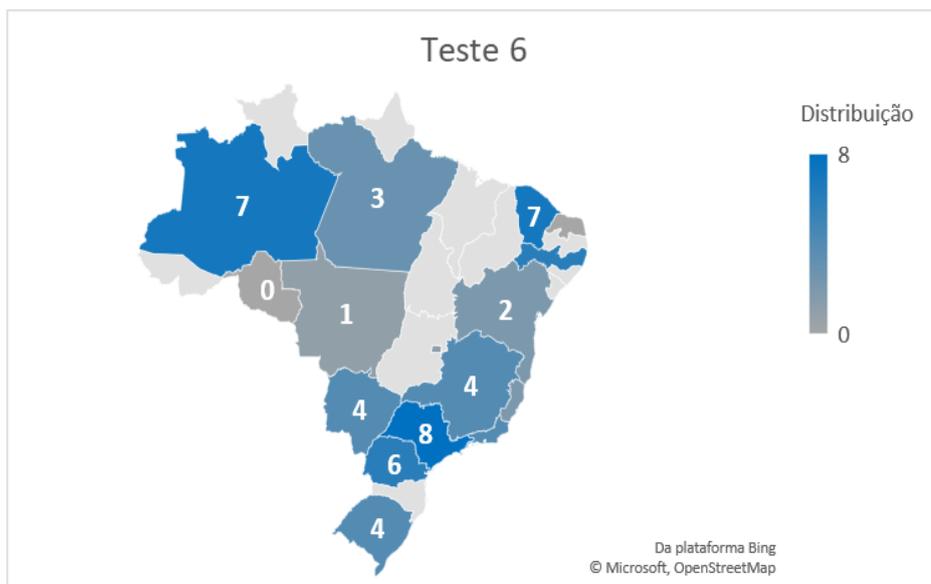


Figura 5.3: Distribuição de servidores: Teste 6

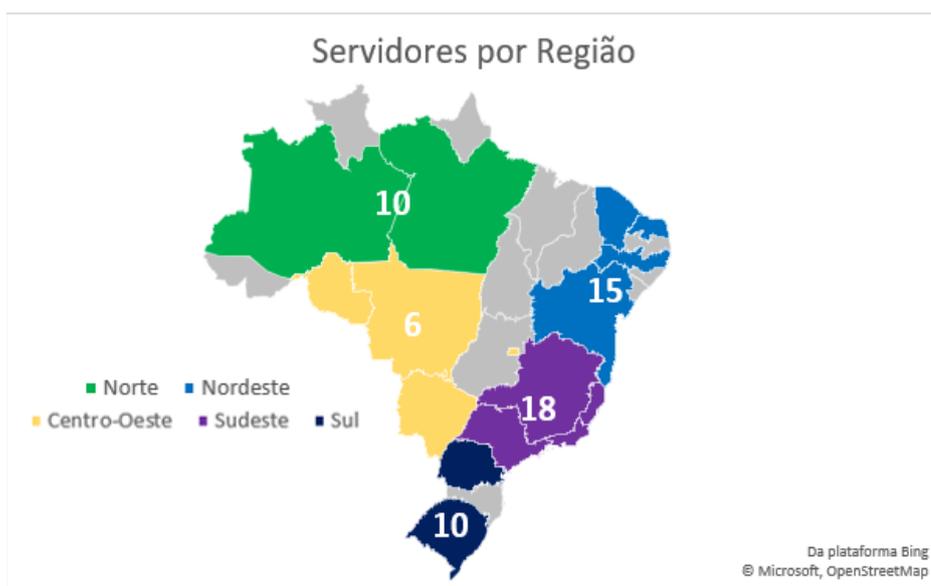


Figura 5.4: Servidores por região

15 inspetores são alocados na Região Nordeste, concentrados nos estados do Ceará e Pernambuco principalmente. Apesar de, em tese, menos movimentada, a região Norte tem 10 servidores alocados, a mesma quantidade da região Sul.

A Figura 5.5 traz ainda a porcentagem de demanda por Região. O gráfico mostra uma predominância de missões no Sudeste do Brasil, com 28% das atividades, o que de forma similar se encontra com o resultado da alocação de 31% dos servidores na região Sudeste. Outra região com impacto de participação elevado é a Região Nordeste, com 24% das demandas localizadas

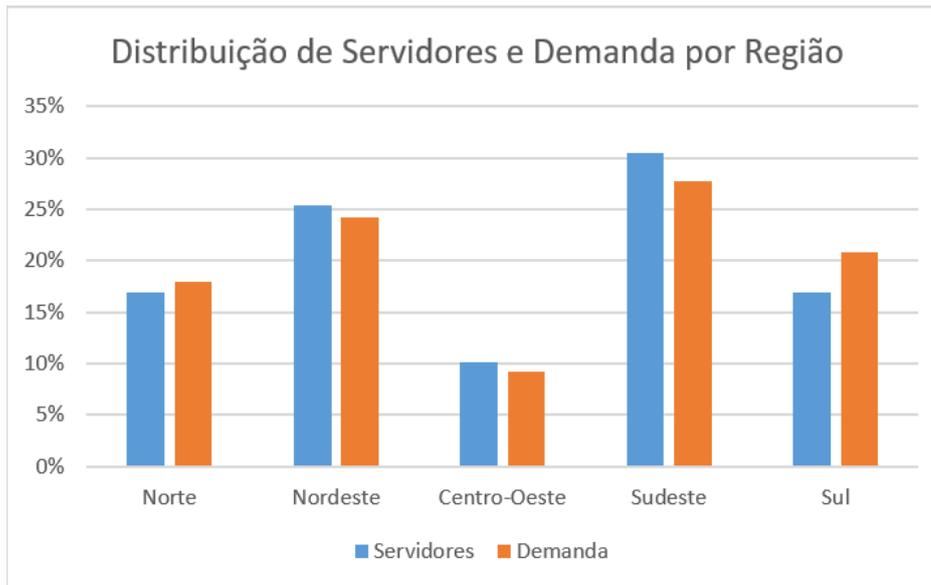


Figura 5.5: Porcentagem de servidores de demanda por região

em aeroportos da região Nordeste, também consonante à alocação de 25% dos servidores em Regionais do Nordeste. Ao contrário, porém, os estados do Centro-Oeste apresentam a menor quantidade de demandas e, consequentemente, menos servidores alocados nessa região pelo modelo matemático. As regiões Norte e Sul apresentam atividade moderada e similar, porém, apesar da mesma quantidade de funcionários alocados, quando observamos o gráfico de distribuição de demanda, é possível verificar que a região do Sul representa 21% das demandas no ano, enquanto a região norte agrega 18% da demanda.

A Tabela 5.8 apresenta a matriz de alocações de capacitações por regional, ou seja, a quantidade de habilitações presentes em cada estado após a otimização do modelo. De forma efetiva, esse é o principal resultado oferecido pelo modelo pois mostra quais e quantas habilitações são necessárias em cada Estado do País para atender as demandas do dataset analisado.

Tabela 5.8: Matriz de alocação de capacidades por regional

ATIVIDADE	SERV	AM	BA	CE	DF	ES	MG	MS	MT	PA	PE	PR	RJ	RN	RO	RS	SP	TOTAL
A1	17	1	0	2	0	0	1	0	0	1	1	1	1	0	0	2	1	11
A2	17	1	0	2	0	0	1	0	0	1	1	1	1	0	0	2	1	11
A3	101	4	2	4	1	2	3	4	0	2	4	5	3	0	0	3	6	43
A4	101	4	2	4	1	2	3	4	0	2	4	5	3	0	0	3	6	43
A5	101	4	2	4	1	2	3	4	0	2	4	5	3	0	0	3	6	43
A6	101	4	2	4	1	2	3	4	0	2	4	5	3	0	0	3	6	43
A7	101	4	2	4	1	2	3	4	0	2	4	5	3	0	0	3	6	43
A8	101	4	2	4	1	2	3	4	0	2	4	5	3	0	0	3	6	43
V1	121	5	2	6	1	2	4	4	1	3	6	6	4	0	0	4	7	55
V2	22	0	2	1	0	1	2	3	0	2	1	5	1	0	0	2	2	22
V3	27	2	2	2	0	2	2	3	0	2	2	5	1	0	0	2	2	27
V4	15	1	0	1	0	0	0	0	1	1	2	1	1	0	0	2	1	11
V5	16	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1	1	1	0	0	2	1	10
V6	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	2
V7	4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	2	4
V8	9	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	2	7
INSP1	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
INSP2	4	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	4
INSP3	8	0	1	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0	1	1	8
INSP4	8	2	0	0	0	0	2	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	8
INSP5	22	0	2	1	0	1	2	3	0	2	1	5	1	0	0	2	2	22
INSP6	17	1	0	2	0	0	0	0	1	1	2	1	1	0	0	2	1	12
INSP7	19	1	0	2	0	0	0	0	1	1	2	1	1	0	0	2	1	12
INSP8	19	1	0	2	0	0	0	0	1	1	2	1	1	0	0	2	1	12
<b>TOTAL</b>	<b>955</b>	<b>44</b>	<b>22</b>	<b>47</b>	<b>9</b>	<b>19</b>	<b>33</b>	<b>39</b>	<b>5</b>	<b>30</b>	<b>48</b>	<b>61</b>	<b>35</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>43</b>	<b>62</b>	

A Coluna "ATIVIDADES" mostra o código das inspeções que, em algum momento do horizonte de tempo analisado, são demandadas em algum aeroporto ou unidade da ANAC. A coluna "SERV" mostra a quantidade de servidores com cada uma das habilitações citadas; por exemplo, para a inspeção codificada como A1, existem 17 servidores habilitados para realiza-la (no conjunto total de servidores, alocados ou não).

As Colunas com os estados brasileiros, mostram quantas habilitações de cada tipo foram alocadas na regional daquele estado pelo modelo; por exemplo, no Rio de Janeiro, foram alocados 3 servidores diferentes com habilitação para atender a inspeção codificada por A3. É interessante observar que algumas das inspeções são "comuns" a vários servidores, como a atividade A7, presente na lista de capacitação de 101 dos 174 servidores; enquanto outras atividades são raras de se encontrar, como a INSP1, que apenas 2 servidores possuem habilitação para realizar. A matriz apresenta ainda, na última coluna, o total de habilitações de cada inspeção alocadas pelo modelo; por exemplo, a inspeção A2 pode ser atendida por 17 funcionários, dos quais, 11 foram alocados pelo modelo nas regionais. A atividade com maior número de servidores alocados é a V1, com 55 de seus 121 servidores alocados pelo modelo. A atividade INSP1, por outro lado, possui apenas 1 alocação, ou seja, apenas um funcionário, dentre todos os alocados pelo modelo, está capacitado para atender à essa inspeção. A linha final da matriz, também apresenta um Total, neste caso, o total de habilitações alocadas em cada Regional; por exemplo, na agência regional de Minas Gerais (MG), com os funcionários alocados pelo modelo, 33 habilitações foram alocadas, das quais, 4 são da inspeção V1.

A matriz de distribuição das capacitações também é importante para analisar o perfil dos funcionários alocados em cada regional, para além da simples quantidade de funcionários. Um exemplo desse fato que fica evidente é a Regional de São Paulo (SP), que segundo a matriz possui 62 habilitações alocadas, ou seja, com a habilitação de todos os 8 funcionários alocados nesta regional, temos 62 habilitações (apenas 3 inspeções não podem ser atendidas por São Paulo: V6; INSP1 e INSP4). Comparando com a regional do Amazonas, no qual 7 servidores alocados possuem 44 habilitações, é possível observar que o modelo aloca servidores mais qualificados (em termos que quantidade de habilitações) em São Paulo do que no Amazonas. Outro ponto no qual podemos observar esse cenário, é a Regional do Paraná (PR), com 6 funcionários alocados, que somam 61 habilitações (segunda regional mais habilitada, porém, com média superior à São Paulo). Pensando de forma contrária, as regionais com menos capacitações alocadas são: Rio Grande do Norte (RN), que não apresenta nenhuma demanda de atividade no dataset;

Roraima (RO), que apresenta demanda, porém não tem nenhum funcionário alocado (ambas as regionais são selecionadas pelo modelo ótimo para serem "fechadas"); Mato Grosso (MT), com 5 habilitações; e Distrito Federal (DF), com 9. A Regional do Mato Grosso, apesar de ter sido aberta pelo modelo, possui apenas um funcionário alocado, com 5 habilitações; enquanto a Regional do Distrito Federal possui também apenas um funcionário alocado, porém com 9 habilitações.

É bom novamente fazer a ressalva de que Distrito Federal, Rio de Janeiro e São Paulo são agências sedes da ANAC, com outros funcionários, além de suas atuações regionais, enquanto que os demais estados possuem apenas agências regionais e seus funcionários. Outro ponto interessante que pode-se observar é a funcionalidade do modelo quanto a quantidade de demanda por habilitação alocada. O Estado do Mato Grosso (MT), por exemplo, possui 10 demandas por inspeção no dataset analisado; o modelo conclui que 1 funcionário apenas, localizado em Mato Grosso, é o ideal. Isso não significa que esse funcionário atende sozinho à todas as demandas, visto que, servidores de outras regionais podem viajar para atender as demandas de Mato Grosso; porém, nesse caso, o servidor alocado em Mato Grosso realmente é responsável, segundo o modelo, por atender à todas as 10 demandas do estado, no aeroporto SBCY (Aeroporto Marechal Rondon - Cuiabá). Isso acontece pois o modelo entende que é mais barato abrir a regional e manter um funcionário habilitado para atender à todas as demandas desse estado do que gastar com viagens de servidores de outros estados para atender à essas demandas.

Na regional do Espírito Santo (ES), acontece algo parecido, porém ainda mais interessante. Existem apenas 2 demandas por inspeção no estado, porém, dois funcionários são alocados para esta regional, por quê isso acontece? Isso ocorre pois ambas as inspeções no Aeroporto de Vitória (SBVT) são da atividade V3, que necessita de uma equipe de 2 servidores para realizá-la; dessa forma, o modelo de otimização entende que é melhor abrir a Regional e manter os dois funcionários alocados nesta regional do que trazer uma equipe de dois servidores de outros estados para atender à essas demandas, mesmo que sejam apenas duas.

De forma geral, é possível observar por esses resultados o funcionamento do modelo proposto e sua capacidade em lidar com o problema de Regionalização exposto para o estudo de caso das agências regionais da ANAC, mesmo com as nuances apresentadas e o desafio das diferentes capacitações. Mais do que encontrar a configuração ótima para esse dataset, é importante que a ferramenta se mostre capaz de lidar com os dados, de forma que mudanças no

dataset não afetem negativamente o modelo. Outro ponto fundamental dos outputs do modelo é fornecer dados que possam gerar diferentes análises para o tomador de decisão em diferentes cenários. Para compreender melhor os limites do modelo e suas respostas diante de alterações nos dados do dataset, é fundamental a realização de uma análise com esse foco, como será apresentado na próxima seção da dissertação.

### 5.3

#### Análise de Sensibilidade

Nesta seção serão apresentados os resultados da análise de sensibilidade do modelo matemático. Como descrito na seção anterior, um ponto muito importante do estudo de caso é fornecer um modelo que se adapte a diferentes cenários, e dentro de um mesmo cenário, à variações no dataset, de modo que o tomador de decisão possa usar o modelo como ferramenta de apoio para diferentes análises. A análise de sensibilidade tem como objetivo entender o comportamento do modelo após algumas variações; Nos objetivos do estudo de caso, foi especificado que o foco seria na otimização da localização das agências regionais da ANAC e seus servidores, que deveriam ser alocados de forma otimizada também para melhor atender às demandas de fiscalização; nesse contexto, a própria agência recomendou um foco em otimizar os custos de transporte dos servidores. Assim, a análise de sensibilidade foi conduzida de forma a entender como o modelo se comporta com variações nos custos de viagem em relação aos custos operacionais.

A Análise de Sensibilidade foi conduzida com uma alteração na função objetivo: A adição de um parâmetro ( $\beta \in [0, 1]$ ), que multiplica os custos de forma inversa; ou seja, " $\beta$ " multiplica o Custo de Transporte de servidores enquanto a expressão  $(1 - \beta)$  multiplica o Custo Operacional, conforme apresentado na Equação 5-1.

$$FO = MIN \sum_{podt} (\beta) \times 2 \text{ CUSTO.TRANS}P_{odt} + \sum_o (1 - \beta) \times \text{CUSTO.OP}_o w_o \quad (5-1)$$

Assim, o modelo foi testado seguindo os parâmetros definidos na Tabela 5.9.

Complementarmente, além de testar como o modelo lida com variações nos dados, a condução da análise de sensibilidade possibilita também a análise de como a variação nos custos altera os resultados, não apenas em

Tabela 5.9: Análise de Sensibilidade

$\beta$	$1 - \beta$
1.0	0.0
0.9	0.1
0,8	0.2
0.7	0.3
0.6	0.4
0.5	0.5
0.4	0.6
0.3	0.7
0.2	0.8
0.1	0.9

termos de custo final, mas também, e principalmente, quais regionais são abertas/fechadas pelo modelo, como os servidores são alocados em cada regional e como as demandas são atendidas. Até o momento no presente trabalho não apresentamos os resultados de custo total do modelo, pois de fato só se torna um resultado relevante quando comparado ao custo total em outros cenários, como nesta seção, de forma à trazer mais análises sobre os resultados obtidos com o modelo desenvolvido.

A Tabela 5.10 descreve os resultados de custo e performance para cada valor de  $\beta$  testado.

Tabela 5.10: Análise de Sensibilidade

$\beta$	Custo Total (unidades monetárias)	Tempo (s)	Servidores Alocados
1.0	21260	270.57	67
0.9	19834	260.13	56
0,8	18408	321.76	53
0.7	16982	441.57	58
0.6	15556	301.00	61
0.5	14130	290.44	58
0.4	12704	359.36	66
0.3	11278	560.92	66
0.2	9713	820.11	59
0.1	7434	2077.48	70

É possível observar que conforme o valor de  $\beta$  reduz, menos peso incorre sobre os Custos de Viagem e mais peso sobre o Custo Operacional, que é constante (por definição do estudo de caso proposto pela ANAC, que possui foco nos custos de viagem), de forma que o custo total reduz, porém isso não significa necessariamente um resultado melhor, pois na verdade a constância do Custo Operacional provoca um aumento na multiplicidade de soluções, de forma que o modelo começa a demorar mais para achar uma solução ótima,

visto que as soluções se tornam mais parecidas do ponto de vista econômico, o que de fato ratifica a decisão de considerar os Custos de Transporte com um peso maior na resolução do problema. A variação praticamente constante fica ainda mais explícita no Gráfico 5.6.

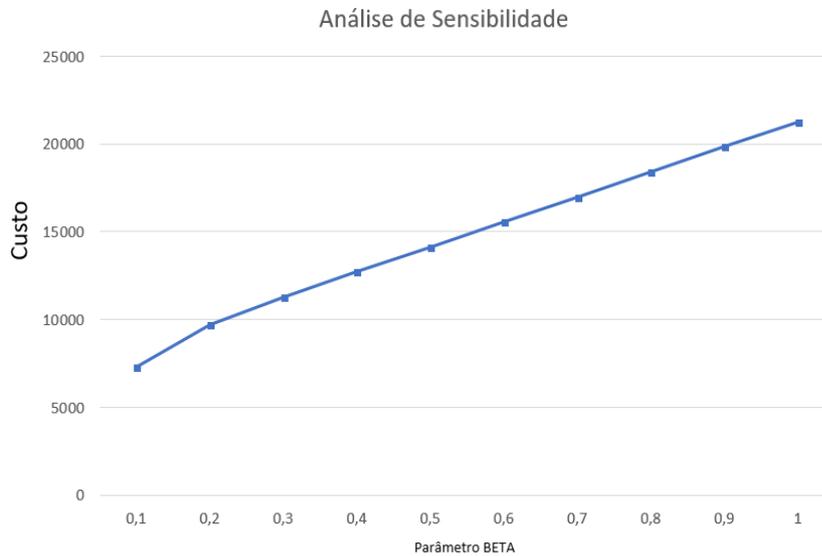


Figura 5.6: Gráfico de Análise de Sensibilidade

A Tabela 5.10 mostra também a quantidade de servidores totais alocados em cada teste (somando os servidores alocados em cada regional da ANAC). Ao contrário do Custo Total, a quantidade de servidores alocados não varia de forma constante e de fácil identificação, porém, ainda assim, é possível observar que o modelo aloca menos servidores nos pontos com maior peso no Custo de servidor. No entanto, é possível observar que o modelo encontra ainda soluções múltiplas, de forma que mesmo em casos nos quais a quantidade de servidores é maior, o custo não aumenta, em comparação aos demais cenários. Uma mudança identificada é quanto à abertura das regionais, a Figura 5.7 por exemplo apresenta a distribuição de servidores para ( $\beta = 0.2$ ), enquanto a Figura 5.8 apresenta a distribuição para ( $\beta = 0.8$ ).

É interessante observar que com ( $\beta = 0.2$ ), uma quantidade menor de regionais são abertas, em relação ao resultado original descrito na seção anterior, na Tabela 5.7, como por exemplo os estados da Bahia (BA), Distrito Federal (DF) e Espírito Santos (ES), que têm suas regionais fechadas no teste com ( $\beta = 0.2$ ), porém, estão abertas no teste ( $\beta = 0.8$ ), assim como no resultado original sem a análise de sensibilidade. A explicação desse resultado é simples; quanto menor o valor de " $\beta$ ", menor o peso da parcela de Custo de Transporte, e maior o peso do Custo Operacional, ou seja, a parcela de Custo Operacional possui maior influência no modelo nesse caso, o que justifica que

AM	9
BA	0
CE	10
DF	0
ES	0
MG	5
MS	2
MT	1
PA	3
PE	6
PR	7
RJ	4
RN	0
RO	0
RS	4
SP	8
TOTAL ALOC	59
TOTAL	174
Não ALOC	115

Figura 5.7: Distribuição de servidores:  $\beta$  0.2

AM	5
BA	2
CE	7
DF	1
ES	2
MG	5
MS	2
MT	1
PA	6
PE	5
PR	3
RJ	3
RN	0
RO	0
RS	5
SP	6
TOTAL ALOC	53
TOTAL	174
Não ALOC	121

Figura 5.8: Distribuição de servidores:  $\beta$  0.8

o modelo reduza o número de regionais abertas (reduzindo os custos operacionais), mesmo que isso aumente os custos com o deslocamento dos servidores.

A primeira parte da análise de sensibilidade é interessante para entender como o equilíbrio entre os Custos de Transporte e Custos Operacionais influenciam no resultado do modelo, e com isso, foi possível observar que o modelo gera múltiplas soluções. Mesmo com o número baixo de servidores alocados, será que esse é o resultado mais otimizado? Essa etapa da Análise de Sensibilidade vai mostrar a resposta do modelo quando adicionamos à função objetivo um termo de Custo de Servidores. O Custo de servidores não é um dado presente no dataset do estudo de caso, porém, é uma ferramenta importante para complementar a análise dos resultados obtidos, otimizando ainda mais a quantidade de servidores alocados, visto que, sem um custo, mesmo que baixo, o modelo pode alocar servidores sem necessidade. Esse estudo não é um dos objetivos do estudo de caso proposto, mas sim, um cenário a mais para a tomada de decisões. A Equação 5-2 mostra a nova função objetivo

para a análise do custo de servidores (CUSTO.SERV).

$$FO = \underset{podt}{MIN} \sum (\beta) \times 2 \text{ CUSTO.TRANS}P_{od}x_{podt} + \sum_o (1 - \beta) \times \text{CUSTO.OP}_ow_o + \sum_{po} \text{CUSTO.SERV} \times z_{po} \tag{5-2}$$

O primeiro ponto testado foi com o custo de servidor baixo (CUSTO.SERV = 10), apenas para analisar o impacto desse custo existir, mesmo que com baixo peso em relação aos demais custos (que possuem ordem de grandeza 10<sup>2</sup>).

A Figura 5.9 compara a distribuição da alocação dos servidores nas regionais da ANAC entre os testes com ( $\beta = 0.4$ ) e ( $\beta = 0.8$ ), com custo de servidores e sem esse custo.

	BETA = 0.4		BETA = 0.8	
	Sem CUSTO SERV.	Com CUSTO SERV.	Sem CUSTO SERV.	Com CUSTO SERV.
AM	6	4	5	4
BA	2	2	2	2
CE	9	4	7	4
DF	2	1	1	1
ES	2	2	2	2
MG	7	3	5	3
MS	3	2	2	2
MT	1	1	1	1
PA	4	3	6	3
PE	5	4	5	4
PR	5	3	3	3
RJ	4	2	3	2
RN	0	0	0	0
RO	0	0	0	0
RS	8	3	5	3
SP	8	4	6	4
TOTAL ALOC	66	38	53	38
TOTAL	174	174	174	174
Não ALOC	108	136	121	136

Figura 5.9: Custo de Servidores:  $\beta = 0.4$  e  $\beta = 0.8$

É interessante observar que existe uma queda considerável no número de servidores alocados em cada regional. Com ( $\beta = 0.4$ ), sem custo dos servidores, são alocados 66 servidores; enquanto que, com custo de alocação dos servidores, apenas 38 alocações são feitas. Isso ocorre pois alocar um servidor tem um custo agora, mesmo que pequeno, que influencia o resultado, otimizando a distribuição. O mesmo comportamento é observado com ( $\beta = 0.8$ ): sem o custo dos servidores, 53 inspetores são alocados; enquanto que, com o custo dos servidores, 38 pessoas são alocadas. O mesmo teste foi realizado com outros valores de " $\beta$ " e todos resultaram na mesma distribuição de servidores, com 38 inspetores alocados, nas mesmas regionais. A explicação para esses resultados

está na parametrização do Custo de alocação de servidores, que está em escala menor em relação aos demais custos, de forma que as soluções não se alteram com a variação de sensibilidade. Assim, os testes foram repetidos, agora com custo de pessoal na mesma ordem de grandeza dos demais (CUSTO.SERV = 500), e os resultados são apresentados na Figura 5.10.

CUSTO SERV. = 500		
BETA =	0.4	0.8
AM	3	4
BA	0	2
CE	3	3
DF	1	1
ES	0	2
MG	2	3
MS	2	2
MT	1	1
PA	3	3
PE	3	3
PR	2	3
RJ	2	2
RN	0	0
RO	0	0
RS	3	3
SP	2	3
TOTAL ALOC	27	35
TOTAL	174	174
Não ALOC	147	139

Figura 5.10: Comparação entre testes com custo de servidores

Os resultados mostram que, com um custo de alocação de servidores na mesma ordem de grandeza dos demais custos, variações na sensibilidade do modelo geram distribuições diferentes também, com apenas 27 inspetores alocados quando  $\beta = 0.4$  e 35 quando  $\beta = 0.8$ . A quantidade de agências abertas pelo modelo também varia, visto que quando  $\beta = 0.4$  o modelo opta por fechar as regionais da Bahia (BA) e Espírito Santo (ES), algo que não acontece na análise realizada sem o custo de alocação de servidores.

Os resultados são explicitados na Tabela 5.11, que apresenta o custo total e o tempo de processamento obtido nos testes realizados.

Tabela 5.11: Análise de Sensibilidade com Custo de Servidores

$\beta$	Custo Total (unidades monetárias)	Tempo (s)	Servidores Alocados
0.4	28832	356.11	27
0.8	36800	313.92	35

É importante comentar que os custos totais sofrem um aumento nos testes com a adição de custos de pessoal, como o esperado, visto que, apesar da redução na quantidade de servidores alocados, com o custo associado à essas alocações, o custo total sofre um incremento considerável. Porém, uma das principais preocupações na modelagem é saber como o modelo reage à

incrementos e testes de sensibilidade e cenários com relação ao tempo de processamento e, nesse aspecto, pouca diferença ocorreu após o incremento na função objetivo. O teste realizado sem custo de pessoal, com  $\beta = 0.4$ , apresentou tempo de processamento de 359.36s, enquanto que o teste com custo de pessoal levou apenas 356.11s. Já para  $\beta = 0.8$ , sem o custo de servidores alocados, o tempo de processamento era de 321.76s, enquanto que com a adição do custo de pessoal o tempo reduziu para 313.92s. Essa redução nos tempos para rodar o modelo, mesmo com a adição de um termo na função objetivo, é muito interessante para nossa análise dos resultados, pois mostra que, de fato, a situação testada anteriormente apresentava múltiplas soluções, o que aumentava a complexidade do programa de otimização. Em outras palavras, podemos concluir que com a adição de mais dados específicos do problema proposto, nesse caso o estudo de caso do programa de Regionalização da ANAC, apesar de a modelagem ser mais complexa, o modelo consegue se adequar e apresentar uma melhor performance.

Como foi descrito no início desta seção, a análise de sensibilidade teve como objetivo expandir os resultados obtidos com o estudo de caso proposto e entender se o modelo oferece suporte para futuras expansões e diferentes testes de cenários, o que é fundamental para garantir a flexibilidade e utilidade de uma ferramenta. Entretanto, apesar de ao longo da análise os cenários testados se tornarem mais específicos e complexos, o desempenho do modelo melhorou em relação ao resultado da seção anterior, o que mostra que o modelo possui a flexibilidade necessária para apoio à tomada de decisões de localização e alocação de servidores e instalações.

A análise de sensibilidade mostrou que o estudo de caso da ANAC pode e deve ser expandido, visto que, com a adição de mais parâmetros, o resultado se mostrou mais bem otimizado; porém, é fundamental ressaltar que a baixa quantidade de servidores recomendada pelo modelo no limite testado pela análise de sensibilidade não é de fato aplicável, visto que a ANAC é uma agência pública do Brasil, que possui especificidades relacionadas a quantidades de servidores e suas alocações. Esse trabalho teve foco na validação do modelo com um problema real, com as preocupações passadas nas entrevistas realizadas com funcionários da ANAC, e o foco em reduzir os custos de transporte; no entanto, se faz necessária a compreensão de que os resultados obtidos com o modelo deve apoiar a tomada de decisão, e não guiá-la 100%. Os resultados apresentados neste trabalho mostram que existe muito trabalho à ser desenvolvido para otimizar a atuação da ANAC, e o modelo se mostrou útil para apoio à tomada de decisões e análise de diferentes cenários.

## 6

### Conclusão

O objetivo da pesquisa foi desenvolver um modelo estratégico de localização-alocação de servidores, utilizando como base o estudo de caso sobre o Projeto de Regionalização da Agência Nacional de Aviação Civil do Brasil (ANAC), que visava distribuir seus servidores em agências regionais e alocá-los de forma a otimizar o atendimento às demandas de inspeção em aeroportos.

Uma revisão sistematizada sobre problemas de localização aplicados à estudos de casos reais foi conduzida. O objetivo foi buscar técnicas e trabalhos recentes envolvendo modelagem de problemas de localização e como os autores lidaram com estudos de casos reais em diferentes contextos. Foram analisados e discutidos 81 artigos; suas estatísticas foram apresentadas e os trabalhos foram classificados em termos de modelagem e soluções propostas por cada autor. Foi possível identificar que os trabalhos se concentram em alguns temas de interesse, como *Bio Supply Chain*, Cadeia de Suprimentos industrial, Transporte, logística urbana e logística humanitária, tratamento de resíduos e logística reversa, além de *Healthcare*. Observou-se que a maioria dos autores utilizou programação inteira-linear mista (MILP), com solução via solver comercial (CPLEX ou GUROBI); a maioria dos autores modelou o problema com o objetivo de minimizar os custos. O contexto de logística humanitária foi aquele que apresentou as principais excessões na análise, com trabalhos com foco em diferentes funções objetivo, análise estocástica e, conseqüentemente devido à maior complexidade, aplicação de heurísticas e meta-heurísticas como métodos de resolução. No contexto da aviação civil, nenhum artigo foi classificado na seleção final, o que mostra um gap na literatura recente de trabalhos com estudos de caso com dados reais, visto que os trabalhos selecionados neste contexto foram excluídos da seleção pois propuseram aplicações em instâncias da literatura. Apesar da revisão não ter sido o foco principal da pesquisa, é também um dos principais resultados obtidos no trabalho, pois pode apoiar futuros pesquisadores e tomadores de decisão, ao reunir os trabalhos mais recentes de localização aplicados à problemas reais. Fica como sugestão para trabalhos futuros a ampliação desta revisão para uma Revisão Sistemática,

adicionando mais resultados estatísticos e o desenvolvimento de um framework sobre estudos de casos em problemas de localização, que poderá servir como base para pesquisas futuras.

Com os insights obtidos da Revisão de Literatura, foi possível desenvolver o modelo matemático de localização-alocação. A interface JuMP, na linguagem de programação Julia, foi utilizada para processar o modelo de programação, e o solver comercial GUROBI foi selecionado para a otimização. A RSL e os testes iniciais realizados com o modelo mostraram que um dos principais desafios é o tempo de processamento, pois a modelagem proposta envolveu uma quantidade elevada de variáveis binárias, o que aumenta a complexidade do processamento. Como o objetivo do estudo de caso previa um horizonte de tempo de 12 meses de dados, a geração de variáveis ocupava um tempo considerável no modelo; para solucionar esse problema, foi desenvolvido um algoritmo, também na linguagem de programação Julia, para gerar os conjuntos de combinações de variáveis em uma etapa de tratamento dos dados, prévia ao modelo base. Os algoritmos de tratamento de dados se mostraram muito eficazes, tornando um problema inviável inicialmente em um problema com tempos de processamento de 57,84 segundos (para um mês de dados); 104,28 segundos (para três meses de dados); 242,37 segundos (para seis meses de dados) e 504,97 segundos (para um ano de dados). Todos os testes realizados com o modelo, em conjunto com os algoritmos de pré tratamento dos dados, geraram resultados ótimos. Mesmo com o bom desempenho do código, análises futuras podem incluir cenários estocásticos, que elevariam a complexidade do dataset, de forma que o desenvolvimento de heurísticas e meta-heurísticas podem ser um grande complemento aos algoritmos propostos nesta dissertação e para a resolução do modelo.

O modelo matemático foi validado utilizando o Estudo de Caso proposto pela ANAC, do Projeto de Regionalização. O modelo se mostrou capaz de lidar com diferentes intervalos de dados do dataset. Para o intervalo desejado de 12 meses, com os dados de demanda amostrados, o modelo alocou 59 servidores da ANAC, do total de 174 servidores estabelecidos previamente. No mapa por regiões, foi possível identificar que o modelo aloca 31% dos servidores (considerando apenas os funcionários alocados nas regionais) na Região Sudeste do Brasil; 25% na Região Nordeste; 17% na Região Norte; 17% na Região Sul e 10% na Região Centro-Oeste.

Foi possível desenvolver uma matriz de distribuição de capacidades por regional. Um dos principais pontos do estudo de caso proposto era o fato

de o problema envolver a capacitação dos servidores para atender demandas específicas de fiscalização, de forma que, o principal resultado gerado pelo modelo é o perfil de capacitações necessárias em cada Agência Regional da ANAC.

O Modelo conseguiu servir ao propósito definido no estudo de caso da ANAC, apresentando resultados úteis para o apoio à tomada de decisões da agência, um bom tempo de processamento dos dados e se mostrou uma ferramenta com validação para aplicação em diferentes problemas de localização-alocação. Sendo assim, fica como sugestão para trabalhos futuros a aplicação do modelo desenvolvido em outras áreas e contextos, com outros estudos de casos que não envolvam a aviação civil por exemplo, assim como Projetos de Regionalização de outras empresas. Com relação ao Estudo de Caso específico da ANAC, fica como sugestão para trabalhos futuros a expansão da análise de dados de modo que um modelo estocástico possa ser aplicado ao problema, capaz de lidar com incertezas baseadas no histórico de demanda.

Por fim, a terceira etapa da pesquisa foi a condução de uma análise de sensibilidade. Foi possível concluir que o modelo apresenta boa flexibilidade, uma característica fundamental para uma ferramenta de apoio à tomada de decisões. O modelo conseguiu lidar com mudanças de pesos e impactos na relação entre Custo de Transporte e Custo Operacional, além da adição de Custos de alocação de servidores, sem sofrer problemas com o tempo de processamento. Dessa forma, foi possível garantir que o modelo se adéque à diferentes cenários, datasets e variações na própria modelagem.

No início da pesquisa foi descrita a importância da relação entre a indústria da aviação e a Pesquisa Operacional, assim como a relação existente entre a aviação civil e a economia de cada região. No mundo atual, no qual se faz necessário um projeto de reestruturação econômica e na cadeia logística de diferentes indústrias para recuperação pós pandemia de COVID-19, esse trabalho contribuí para apresentar soluções de como lidar com problemas reais, e pode pavimentar um caminho de melhorias e investimentos em pesquisas deste setor no Brasil.

## Referências

AIR CARGO WORLD. **Passenger freighters good solution for vaccine airfreight challenge**. 2020. Disponível em:

<<https://aircargoworld.com/news/specialty-cargo/passenger-freighters-good-solution-for-vaccine-airfreight-challenges/>>.

Acesso em: 12 dez. 2020.

AKGÜL, A.; ULUSAM SEÇKINER, S. Optimization of biomass to bioenergy supply chain with tri-generation and district heating and cooling network systems. Elsevier Ltd, v. 137, 2019. DOI: 10.1016/j.cie.2019.106017.

ANAC. Projeto Safety Oversight: A04 - Relatório técnico de resultados do modelo inicial, 2019.

ARAS, N.; BILGE, Ü. Robust supply chain network design with multi-products for a company in the food sector. Elsevier Inc., v. 60, p. 526–539, 2018. DOI: 10.1016/j.apm.2018.03.034.

ARIA, M.; CUCCURULLO, C. Bibliometrix: An R tool for comprehensive analysis of scientific literature. **Journal of Informetrics**, v. 11, p. 959–975, 2017.

AYDEMIR-KARADAG, A. A profit-oriented mathematical model for hazardous waste locating- routing problem. Elsevier Ltd, v. 202, p. 213–225, 2018. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.08.106.

BAKER, D.; MERKERT, R.; KAMRUZZAMAN, M. Regional aviation and economic growth: cointegration and causality analysis in Australia. **Journal of Transport Geography**, Elsevier, v. 43, p. 140–150, 2015.

BANGUERA, L. et al. Reverse logistics network design under extended producer responsibility: The case of out-of-use tires in the Gran Santiago city of Chile. Elsevier B.V., v. 205, p. 193–200, 2018. DOI: 10.1016/j.ijpe.2018.09.006.

BAO, S. et al. Optimizing watchtower locations for forest fire monitoring using location models. **Fire safety journal**, Elsevier, v. 71, p. 100–109, 2015.

BARNHART, C.; BELOBABA, P.; ODoni, A. R. Applications of operations research in the air transport industry. **Transportation science**, INFORMS, v. 37, n. 4, p. 368–391, 2003.

- BILIR, C.; EKICI, S.; ULENGIN, F. An integrated multi-objective supply chain network and competitive facility location model. Elsevier Ltd, v. 108, p. 136–148, 2017. DOI: 10.1016/j.cie.2017.04.020.
- BOZORGI-AMIRI, A.; KHORSI, M. A dynamic multi-objective location–routing model for relief logistic planning under uncertainty on demand, travel time, and cost parameters. Springer-Verlag London Ltd, v. 85, n. 5-8, p. 1633–1648, 2016. DOI: 10.1007/s00170-015-7923-3.
- ÇAKMAK, E. et al. Analyzing the location of city logistics centers in Istanbul by integrating Geographic Information Systems with Binary Particle Swarm Optimization algorithm. Elsevier Ltd, v. 9, n. 1, p. 59–67, 2021.
- CAMPBELL, J. F. Integer programming formulations of discrete hub location problems. **European Journal of Operational Research**, Elsevier, v. 72, n. 2, p. 387–405, 1994.
- CANCA, D.; BARRENA, E. The integrated rolling stock circulation and depot location problem in railway rapid transit systems. Elsevier Ltd, v. 109, p. 115–138, 2018. DOI: 10.1016/j.tre.2017.10.018.
- CHAIWUTTISAK, P. et al. Location of low-cost blood collection and distribution centres in Thailand. Elsevier, v. 9, p. 7–15, 2016. DOI: 10.1016/j.orhc.2016.02.001.
- CHARLES, A. et al. Designing an efficient humanitarian supply network. Elsevier B.V., v. 47-48, p. 58–70, 2016. DOI: 10.1016/j.jom.2016.05.012.
- CHATZIKONTIDOU, A. et al. Flexible supply chain network design under uncertainty. Institution of Chemical Engineers, v. 128, p. 290–305, 2017. DOI: 10.1016/j.cherd.2017.10.013.
- CHAUHAN, D.; UNNIKRIISHNAN, A.; FIGLIOZZI, M. Maximum coverage capacitated facility location problem with range constrained drones. Elsevier Ltd, v. 99, p. 1–18, 2019. DOI: 10.1016/j.trc.2018.12.001.
- CHEN, A.; YU, T.-Y. Network based temporary facility location for the Emergency Medical Services considering the disaster induced demand and the transportation infrastructure in disaster response. Elsevier Ltd, v. 91, p. 408–423, 2016. DOI: 10.1016/j.trb.2016.06.004.
- CHURCH, R.; REVELLE, C. The maximal covering location problem. **Papers of the regional science association**, Springer-Verlag, v. 32, p. 101–118, 1974.

- CHURCH, R. L.; REVELLE, C. S. Theoretical and computational links between the p-median, location set-covering, and the maximal covering location problem. **Geographical Analysis**, Wiley Online Library, v. 8, n. 4, p. 406–415, 1976.
- DANTAS, T. M.; OLIVEIRA, F. L. C.; REPOLHO, H. M. V. Air transportation demand forecast through Bagging Holt Winters methods. **Journal of Air Transport Management**, Elsevier, v. 59, p. 116–123, 2017.
- DANTRAKUL, S.; LIKASIRI, C.; PONGVUTHITHUM, R. Applied p-median and p-center algorithms for facility location problems. **Expert Systems with Applications**, Elsevier, v. 41, n. 8, p. 3596–3604, 2014.
- FALAGAS, M. E. et al. Comparison of PubMed, Scopus, Web of Science, and Google Scholar: strengths and weaknesses. **The FASEB Journal**, v. 22, n. 2, p. 338–342, 2008.
- FARAHANI, M.; RAHMANI, D. Production and distribution planning in petroleum supply chains regarding the impacts of gas injection and swap. Elsevier Ltd, v. 141, p. 991–1003, 2017. DOI: 10.1016/j.energy.2017.10.013.
- FARAHANI, R. Z.; ASGARI, N. et al. Covering problems in facility location: A review. **Computers & Industrial Engineering**, Elsevier, v. 62, n. 1, p. 368–407, 2012.
- FARAHANI, R. Z.; HEKMATFAR, M. et al. Hub location problems: A review of models, classification, solution techniques, and applications. **Computers & Industrial Engineering**, Elsevier, v. 64, n. 4, p. 1096–1109, 2013.
- FARAHANI, R. Z.; REZAPOUR, S. et al. Competitive supply chain network design: An overview of classifications, models, solution techniques and applications. **Omega**, Elsevier, v. 45, p. 92–118, 2014.
- FARAHANI, R. Z.; STEADIESEIFI, M.; ASGARI, N. Multiple criteria facility location problems: A survey. **Applied mathematical modelling**, Elsevier, v. 34, n. 7, p. 1689–1709, 2010.
- GAN, M. et al. Optimal Urban Logistics Facility Location with Consideration of Truck-Related Greenhouse Gas Emissions: A Case Study of Shenzhen City. Hindawi Limited, v. 2018, 2018. DOI: 10.1155/2018/8439582.
- GHADGE, A. et al. Facility location for a closed-loop distribution network: a hybrid approach. Emerald Group Publishing Ltd., v. 44, n. 9, p. 884–902, 2016. DOI: 10.1108/IJRDM-07-2015-0094.

- GITAL DURMAZ, Y.; BILGEN, B. Multi-objective optimization of sustainable biomass supply chain network design. Elsevier Ltd, v. 272, 2020.
- GOTO, H.; MURRAY, A. Acoustical properties in emergency warning siren coverage planning. Elsevier Ltd, v. 81, 2020.
- GREEN, R. K. Airports and economic development. **Real estate economics**, Wiley Online Library, v. 35, n. 1, p. 91–112, 2007.
- GUO, F.; YANG, J.; LU, J. The battery charging station location problem: Impact of users' range anxiety and distance convenience. Elsevier Ltd, v. 114, p. 1–18, 2018. DOI: 10.1016/j.tre.2018.03.014.
- HAKIM, M. M.; MERKERT, R. The causal relationship between air transport and economic growth: Empirical evidence from South Asia. **Journal of Transport Geography**, Elsevier, v. 56, p. 120–127, 2016.
- HAKIMI, S. L. Optimum locations of switching centers and the absolute centers and medians of a graph. **Operations research**, Informs, v. 12, n. 3, p. 450–459, 1964.
- HAMDAN, B.; DIABAT, A. A two-stage multi-echelon stochastic blood supply chain problem. Elsevier Ltd, v. 101, p. 130–143, 2019. DOI: 10.1016/j.cor.2018.09.001.
- HASANI, A.; MOKHTARI, H. An integrated relief network design model under uncertainty: A case of Iran. Elsevier B.V., v. 111, p. 22–36, 2019. DOI: 10.1016/j.ssci.2018.09.004.
- HIDAYAT, Y.; SUTANDI; JOELIANTO, E. Integrated supply chain model of distribution regionalization and network optimization of white crystal sugar traditional market. International Association of Engineers, v. 29, n. 1, p. 302–311, 2021.
- INTREVADO, P.; VERTER, V.; TREMBLAY, L. Patient-centric design of long-term care networks. Springer New York LLC, v. 22, n. 2, p. 376–390, 2019. DOI: 10.1007/s10729-018-9445-7.
- JI, Y. et al. A Multimodal Passenger-and-Package Sharing Network for Urban Logistics. Hindawi Limited, v. 2020, 2020. DOI: 10.1155/2020/6039032.
- JOUZDANI, J. et al. Robust design and planning for a multi-mode multi-product supply network: a dairy industry case study. Springer, v. 20, n. 3, p. 1811–1840, 2020.

- KARIMI, H.; SETAK, M. A bi-objective incomplete hub location-routing problem with flow shipment scheduling. Elsevier Inc., v. 57, p. 406–431, 2018. DOI: 10.1016/j.apm.2018.01.012.
- KAYA, O.; OZKOK, D. A Blood Bank Network Design Problem with Integrated Facility Location, Inventory and Routing Decisions. Springer, v. 20, n. 3, p. 757–783, 2020.
- KCHAOU BOUJELBEN, M.; BOULAKSIL, Y. Modeling international facility location under uncertainty: A review, analysis, and insights. Taylor e Francis Ltd., v. 50, n. 6, p. 535–551, 2018. DOI: 10.1080/24725854.2017.1408165.
- KCHAOU BOUJELBEN, M.; GICQUEL, C.; MINOUX, M. A MILP model and heuristic approach for facility location under multiple operational constraints. Elsevier Ltd, v. 98, p. 446–461, 2016. DOI: 10.1016/j.cie.2016.06.022.
- KIM, H.; EOM, M.; KIM, B.-I. Development of strategic hydrogen refueling station deployment plan for Korea. Elsevier Ltd, v. 45, n. 38, p. 19900–19911, 2020.
- KLOSE, A.; DREXL, A. Facility location models for distribution system design. **European journal of operational research**, Elsevier, v. 162, n. 1, p. 4–29, 2005.
- KÜHLE, S.; TEISCHINGER, A.; GRONALT, M. Optimal location of laminated beech production plants within the solid hardwood supply network in Austria. Finnish Society of Forest Science, v. 53, n. 3, 2019. DOI: 10.14214/sf.10074.
- HE-LAMBERT, L. et al. Determining a geographic high resolution supply chain network for a large scale biofuel industry. Elsevier Ltd, v. 218, p. 266–281, 2018. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.02.162.
- LANCIA, G.; RINALDI, F.; SERAFINI, P. A facility location model for air pollution detection. Hindawi Limited, v. 2018, 2018. DOI: 10.1155/2018/1683249.
- LI, L.-J.; ZHOU, R.-J. Optimization of large-scale water transfer networks: Conic integer programming model and distributed parallel algorithms. John Wiley e Sons Inc., v. 63, n. 5, p. 1566–1581, 2017. DOI: 10.1002/aic.15505.
- LI, Q.; ZENG, B.; SAVACHKIN, A. Reliable facility location design under disruptions. **Computers & Operations Research**, Elsevier, v. 40, n. 4, p. 901–909, 2013.

- LI, X. et al. Covering models and optimization techniques for emergency response facility location and planning: a review. **Mathematical Methods of Operations Research**, Springer, v. 74, n. 3, p. 281–310, 2011.
- LI, Y. et al. Optimal physician assignment and patient demand allocation in an outpatient care network. Elsevier Ltd, v. 72, p. 107–117, 2016. DOI: 10.1016/j.cor.2016.02.013.
- LIM-APO, F.; HAMACHER, S.; MARCHESI, J. **Alocação de colaboradores qualificados em missões de fiscalização de uma agência reguladora**. 2021. Diss. (Mestrado) – PUC-Rio.
- LIU, M.; XU, X.; ZHANG, D. Integrated optimization model for distribution network design: a case study of the clothing industry. Blackwell Publishing Ltd, v. 26, n. 4, p. 1269–1292, 2019. DOI: 10.1111/itor.12628.
- LIU, M.; YANG, D.; HAO, F. Optimization for the Locations of Ambulances under Two-Stage Life Rescue in the Emergency Medical Service: A Case Study in Shanghai, China. Hindawi Limited, v. 2017, 2017. DOI: 10.1155/2017/1830480.
- LIU, S.; PAPAGEORGIOU, L.; SHAH, N. Optimal design of low-cost supply chain networks on the benefits of new product formulations. Elsevier Ltd, v. 139, 2020. DOI: 10.1016/j.cie.2019.106189.
- MA, Y.; SHI, X.; QIU, Y. Hierarchical Multimodal Hub Location with Time Restriction for China Railway (CR) Express Network. Institute of Electrical e Electronics Engineers Inc., v. 8, p. 61395–61404, 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2983423.
- MAHJOUB, N. et al. Optimal design of the second and third generation biofuel supply network by a multi-objective model. Elsevier Ltd, v. 256, 2020.
- MAHMOODJANLOO, M. et al. A multi-modal competitive hub location pricing problem with customer loyalty and elastic demand. Elsevier Ltd, v. 123, 2020.
- MARAZZO, M.; SCHERRE, R.; FERNANDES, E. Air transport demand and economic growth in Brazil: A time series analysis. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, Elsevier, v. 46, n. 2, p. 261–269, 2010.
- MARTÍNEZ, J.; ROMÁN, D.; OZUNA, L. Mixed Integer Programming Model for Facility Location Problems: Case Study for Consolidation Centers. Springer, v. 25, n. 6, p. 2118–2125, 2020.
- MEDRANO-GÓMEZ, X. et al. Using the maximal covering location problem to design a sustainable recycling network. Elsevier Ltd, v. 275, 2020.

- MELO, M. T.; NICKEL, S.; SALDANHA-DA-GAMA, F. Facility location and supply chain management—A review. **European journal of operational research**, Elsevier, v. 196, n. 2, p. 401–412, 2009.
- MILLSTEIN, M.; CAMPBELL, J. Total Hockey optimizes omnichannel facility locations. *INFORMS Inst.for Operations Res.and the Management Sciences*, v. 48, n. 4, p. 340–356, 2018. DOI: 10.1287/inte.2018.0942.
- MIRET, C. et al. Design of bioethanol green supply chain: Comparison between first and second generation biomass concerning economic, environmental and social criteria. Elsevier Ltd, v. 85, p. 16–35, 2016. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2015.10.008.
- MOHAMMADI, M.; JULA, P.; TAVAKKOLI-MOGHADDAM, R. Design of a reliable multi-modal multi-commodity model for hazardous materials transportation under uncertainty. Elsevier B.V., v. 257, n. 3, p. 792–809, 2017. DOI: 10.1016/j.ejor.2016.07.054.
- MOHAMMADI, M.; TAVAKKOLI-MOGHADDAM, R. et al. A game-based meta-heuristic for a fuzzy bi-objective reliable hub location problem. Elsevier Ltd, v. 50, p. 1–19, 2016. DOI: 10.1016/j.engappai.2015.12.009.
- MOHAMMED, A.; WANG, Q.; LI, X. A cost-effective decision-making algorithm for an RFID-enabled HMSC network design A multi-objective approach. Emerald Group Publishing Ltd., v. 117, n. 9, p. 1782–1799, 2017. DOI: 10.1108/IMDS-02-2016-0074.
- MOHER, D. et al. Preferred reporting items for systematic review and meta-analysis protocols (PRISMA-P) 2015 statement. **Systematic reviews**, BioMed Central, v. 4, n. 1, p. 1–9, 2015.
- MOHSENI, S.; PISHVAEE, M. S.; SAHEBI, H. Robust design and planning of microalgae biomass-to-biodiesel supply chain: A case study in Iran. **Energy**, Elsevier, v. 111, p. 736–755, 2016.
- MOKHTARZADEH, M. et al. A hybrid of clustering and meta-heuristic algorithms to solve a p-mobile hub location–allocation problem with the depreciation cost of hub facilities. Elsevier Ltd, v. 98, 2021.
- MORENO, A.; ALEM, D.; FERREIRA, D. Heuristic approaches for the multiperiod location-transportation problem with reuse of vehicles in emergency logistics. Elsevier Ltd, v. 69, p. 79–96, 2016. DOI: 10.1016/j.cor.2015.12.002.
- MURALI, P.; ORDÓÑEZ, F.; DESSOUKY, M. M. Facility location under demand uncertainty: Response to a large-scale bio-terror attack. **Socio-Economic Planning Sciences**, Elsevier, v. 46, n. 1, p. 78–87, 2012.

- NEVRLÝ, V. et al. Location of mixed municipal waste treatment facilities: Cost of reducing greenhouse gas emissions. Elsevier Ltd, v. 239, 2019. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118003.
- NICOLA, M. et al. The socio-economic implications of the coronavirus pandemic (COVID-19): A review. **International Journal of Surgery**, v. 78, p. 185–193, 2020.
- OSORIO-MORA, A. et al. Multimodal Capacitated Hub Location Problems with Multi-Commodities: An Application in Freight Transport. Hindawi Limited, v. 2020, 2020. DOI: 10.1155/2020/2431763.
- OWEN, S. H.; DASKIN, M. S. Strategic facility location: A review. **European journal of operational research**, Elsevier, v. 111, n. 3, p. 423–447, 1998.
- PAUL, J.; MACDONALD, L. Location and capacity allocations decisions to mitigate the impacts of unexpected disasters. Elsevier, v. 251, n. 1, p. 252–263, 2016. DOI: 10.1016/j.ejor.2015.10.028.
- PENG, C.; DELAGE, E.; LI, J. Probabilistic envelope constrained multiperiod stochastic emergency medical services location model and decomposition scheme. **INFORMS Inst.for Operations Res.and the Management Sciences**, v. 54, n. 6, p. 1471–1494, 2020.
- RAMEZANI, M.; BASHIRI, M.; TAVAKKOLI-MOGHADDAM, R. A new multi-objective stochastic model for a forward/reverse logistic network design with responsiveness and quality level. **Applied Mathematical Modelling**, Elsevier, v. 37, n. 1-2, p. 328–344, 2013.
- RATHORE, P.; SARMAH, S. Modeling transfer station locations considering source separation of solid waste in urban centers: A case study of Bilaspur city, India. Elsevier Ltd, v. 211, p. 44–60, 2019. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.11.100.
- RENTIZELAS, A.; SHPAKOVA, A.; MAŠEK, O. Designing an optimised supply network for sustainable conversion of waste agricultural plastics into higher value products. Elsevier Ltd, v. 189, p. 683–700, 2018. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.04.104.
- RODRIGUEZ, S.; DE LA FUENTE, R.; AGUAYO, M. A facility location and equipment emplacement technique model with expected coverage for the location of fire stations in the Concepción province, Chile. Elsevier Ltd, v. 147, 2020.

- SAADATI, M.; HOSSEININEZHAD, S. Designing a hub location model in a bagasse-based bioethanol supply chain network in Iran (case study: Iran sugar industry). Elsevier Ltd, v. 122, p. 238–256, 2019. DOI: 10.1016/j.biombioe.2019.01.013.
- ŞAHİN, G.; SÜRAL, H.; MERAL, S. Locational analysis for regionalization of Turkish Red Crescent blood services. **Computers & Operations Research**, Elsevier, v. 34, n. 3, p. 692–704, 2007.
- SCAPARRA, M. P.; CHURCH, R. L. A bilevel mixed-integer program for critical infrastructure protection planning. **Computers & Operations Research**, Elsevier, v. 35, n. 6, p. 1905–1923, 2008.
- SHI, J. et al. A bi-objective multi-period facility location problem for household e-waste collection. Taylor e Francis Ltd., v. 58, n. 2, p. 526–545, 2020. DOI: 10.1080/00207543.2019.1598591.
- ŠOMPLÁK, R. et al. Pricing and advertising strategies in conceptual waste management planning. Elsevier Ltd, v. 239, 2019. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118068.
- TADAROS, M. et al. Location of facilities and network design for reverse logistics of lithium-ion batteries in Sweden. Springer, 2020. DOI: 10.1007/s12351-020-00586-2.
- TANAKA, K.-I.; TORIUMI, S. Extension of the maximum flow-covering location and service start time problem to allow flexible consumption. Japan Society of Mechanical Engineers, v. 10, n. 3, 2016. DOI: 10.1299/jamdsm.2016jamdsm0044.
- TANG, L. et al. Reliable facility location problem with facility protection. Public Library of Science, v. 11, n. 9, 2016. DOI: 10.1371/journal.pone.0161532.
- TANG, X. et al. Network design of a multi-period collaborative distribution system. Springer Verlag, v. 10, n. 2, p. 279–290, 2019. DOI: 10.1007/s13042-017-0713-5.
- TEIXEIRA, J. et al. Location of courts of justice: The making of the new judiciary map of Portugal. Elsevier B.V., v. 272, n. 2, p. 608–620, 2019. DOI: 10.1016/j.ejor.2018.06.029.
- THOMÉ, A. M. T.; SCAVARDA, L. F.; SCAVARDA, A. J. Conducting systematic literature review in operations management. **Production Planning & Control**, Taylor & Francis, v. 27, n. 5, p. 408–420, 2016.

- TONISSEN, D.; ARTS, J.; SHEN, Z.-J. Maintenance location routing for rolling stock under line and fleet planning uncertainty. *INFORMS Inst.for Operations Res.and the Management Sciences*, v. 53, n. 5, p. 1252–1270, 2019. DOI: 10.1287/trsc.2018.0866.
- TÖNISSEN, D.; ARTS, J. Economies of scale in recoverable robust maintenance location routing for rolling stock. *Elsevier Ltd*, v. 117, p. 360–377, 2018. DOI: 10.1016/j.trb.2018.09.006.
- UPCHURCH, C.; KUBY, M. Comparing the p-median and flow-refueling models for locating alternative-fuel stations. **Journal of Transport Geography**, Elsevier, v. 18, n. 6, p. 750–758, 2010.
- UTKU, D.; EROL, S. The hazardous waste location and routing problem: an application in Marmara Region in Turkey. *Springer Nature*, v. 2, n. 2, 2020. DOI: 10.1007/s42452-020-2107-7.
- VAHDANI, B.; AHMADZADEH, E. Designing a realistic ICT closed loop supply chain network with integrated decisions under uncertain demand and lead time. *Elsevier B.V.*, v. 179, p. 34–54, 2019. DOI: 10.1016/j.knosys.2019.05.003.
- VIEIRA, I.; BARROS, M. de; CORMACK, A. Hierarchical facility location model for allocating cancer treatment units in interior of Rio de Janeiro. v. 29, p. 1–13, 2019. DOI: 10.1590/0103-6513.20190026.
- WANG, J.; LIU, H. et al. A new partial coverage locating model for cooperative fire services. *Elsevier Inc.*, v. 373, p. 527–538, 2016. DOI: 10.1016/j.ins.2016.06.030.
- WANG, J.; SITU, C.; YU, M. The post-disaster emergency planning problem with facility location and people/resource assignment. *Emerald Group Publishing Ltd.*, v. 49, n. 10, p. 2385–2418, 2019. DOI: 10.1108/K-04-2019-0289.
- WANG, Y.; GONG, Z.; LEV, B. A Two-Stage Stochastic Programming Model for Pre-positioning of Relief Supplies. In: SPRINGER. *INTERNATIONAL Conference on Management Science and Engineering Management*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 35–44.
- WEBER, A.; PAPAGEORGIOU, L. Design of hydrogen transmission pipeline networks with hydraulics. *Institution of Chemical Engineers*, v. 131, p. 266–278, 2018. DOI: 10.1016/j.cherd.2018.01.022.
- YADAV, V. et al. A feasibility study for the locations of waste transfer stations in urban centers: A case study on the city of Nashik, India. *Elsevier Ltd*, v. 126, p. 191–205, 2016. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.03.017.

YAN, S. et al. Rental bike location and allocation under stochastic demands. Elsevier Ltd, v. 107, p. 1–11, 2017. DOI: 10.1016/j.cie.2017.02.018.

OU-YANG, C.; ANSARI, R. Applying a hybrid particle swarm optimization *TabusearchalgorithmtoafacilitylocationcaseinJakarta*. Taylor e Francis Ltd., v. 34, n. 3, p. 199–212, 2017. DOI: 10.1080/21681015.2016.1243167.

YU, H.; TONG, X. Producer vs. local government: The locational strategy for end-of-life photovoltaic modules recycling in Zhejiang province. Elsevier B.V., v. 169, 2021.

ZHANG, C. et al. MIP models and a hybrid method for the capacitated air-cargo network planning and scheduling problems. Elsevier Ltd, v. 103, p. 158–173, 2017. DOI: 10.1016/j.tre.2017.05.003.

ZHAO, N.; LEHMANN, J.; YOU, F. Poultry Waste Valorization via Pyrolysis Technologies: Economic and Environmental Life Cycle Optimization for Sustainable Bioenergy Systems. American Chemical Society, v. 8, n. 11, p. 4633–4646, 2020.

ZHOU, R.-J.; LI, L.-J. Joint capacity planning and distribution network optimization of coal supply chains under uncertainty. John Wiley e Sons Inc., v. 64, n. 4, p. 1246–1261, 2018. DOI: 10.1002/aic.16012.

ZUNIGA VAZQUEZ, D. et al. Integrating environmental and social impacts into optimal design of guayule and guar supply chains. Elsevier Ltd, v. 146, 2021.

## A

### Apêndice: Resultados do Estudo de Caso

Na Seção 5.1 da dissertação, os resultados computacionais foram descritos por meio de 6 testes, dos quais, os 4 últimos testes foram realizados com o dataset completo, alterando apenas o horizonte de tempo em meses. Para realizar a análise dos resultados obtidos, serão apresentados os resultados de localização dos servidores para o Teste 3, Teste 4 e Teste 5; com 1 mês, 3 meses e 6 meses de horizonte de evento, respectivamente.

A Tabela 5.5 apresenta a quantidade de servidores alocados em cada regional da ANAC, que é ilustrada no mapa da Figura A.1.

Tabela A.1: Resultados: Teste 3

<b>Regional</b>	<b>Servidores</b>
AM	0
BA	0
CE	1
DF	0
ES	0
MG	3
MS	2
MT	0
PA	3
PE	1
PR	3
RJ	0
RN	0
RO	0
RS	1
SP	2
TOTAL ALOCADOS	16
TOTAL NÃO ALOCADOS	158
TOTAL	174

O mapa de distribuição de servidores é interessante para observar as regiões com mais atendimentos, e como esse perfil se altera conforme aumentamos a cobertura da demanda anual da ANAC. O Teste 3, por exemplo, mostra que grande parte da demanda está localizada na região sudeste e sul do Brasil. Ainda assim, mais importante é observar como poucos servidores são alocados,

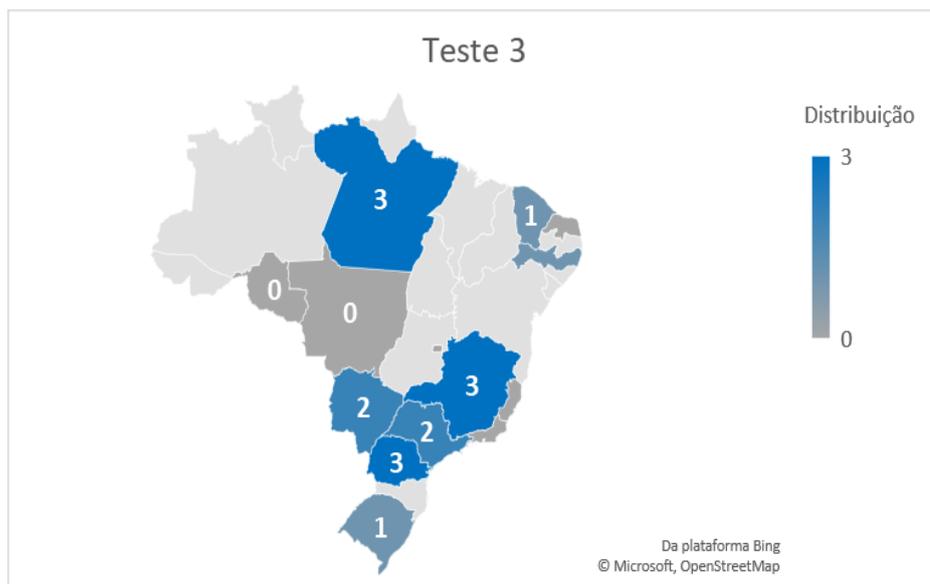


Figura A.1: Distribuição de servidores: Teste 3

de um total de 174 inspetores, apenas 16 são realmente utilizados, de forma otimizada, em um mês de demanda.

A Tabela A.2 apresenta os resultados do Teste 4, com 3 meses de cobertura de demanda. A Figura A.2 mostra a distribuição regional do Teste 4.

Tabela A.2: Resultados: Teste 4

Regional	Servidores
AM	3
BA	0
CE	7
DF	2
ES	0
MG	4
MS	4
MT	1
PA	3
PE	0
PR	5
RJ	0
RN	0
RO	0
RS	1
SP	6
TOTAL ALOCADOS	36
TOTAL NÃO ALOCADOS	138
TOTAL	174

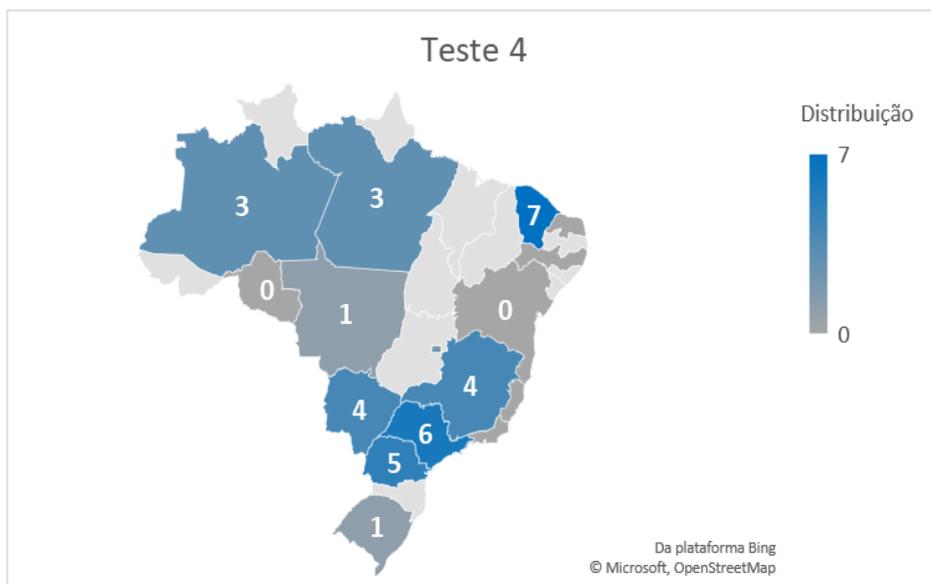


Figura A.2: Distribuição de servidores: Teste 4

Com 3 meses já é possível observar uma distribuição mais uniforme entre as regiões do Brasil, porém, com os servidores concentrados em estados específicos, como São Paulo e Ceará, o que já nos faz observar uma tendência do modelo de manter o máximo de servidores possíveis nos estados com maior demanda e/ou com arcos de viagem mais baratos.

A Tabela A.3 apresenta os resultados do Teste 5, com 6 meses de cobertura de demanda. A Figura A.3 mostra a distribuição regional do Teste 5.

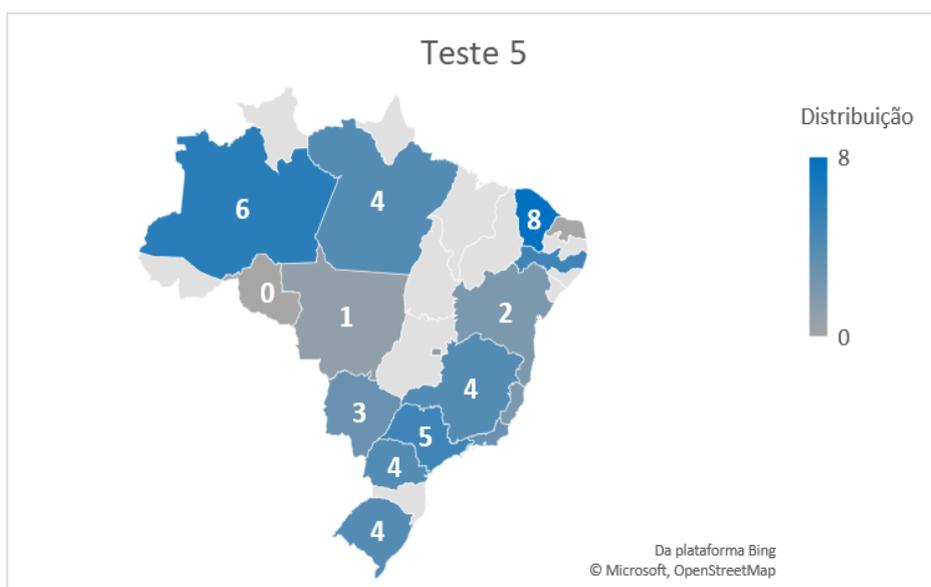


Figura A.3: Distribuição de servidores: Teste 5

Tabela A.3: Resultados: Teste 5

<b>Regional</b>	<b>Servidores</b>
AM	6
BA	2
CE	8
DF	1
ES	2
MG	4
MS	3
MT	1
PA	4
PE	5
PR	4
RJ	3
RN	0
RO	0
RS	4
SP	5
TOTAL ALOCADOS	52
TOTAL NÃO ALOCADOS	122
TOTAL	174

Com 6 meses de horizonte já é possível observar uma melhor distribuição dos servidores. De certa forma ainda se vê uma predisposição do modelo por 3 estados: Amazonas, São Paulo e Ceará; em três regiões distintas do País: Norte, Nordeste e Sudeste/Sul. Isso ocorre pois, com a maior cobertura da demanda anual da ANAC, a quantidade de atividades em aeroportos em regiões menos movimentadas aumenta, se tornando mais importante uma melhor distribuição das regionais. O aumento na quantidade de servidores alocado também é identificado, porém, ainda assim, a maioria dos funcionários seguem sem ser alocados. No Teste 5, apenas 52 inspetores são alocados, e o modelo escolhe pela não alocação dos demais 122 servidores.