

**Guina Guadalupe Sotomayor Alzamora**

**Estratégias de localização de hubs para o  
sistema de transporte aéreo brasileiro**

**Tese de Doutorado**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção do Departamento de Engenharia Industrial da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção Do título de Doutor em Engenharia de Produção

Orientador: Prof<sup>a</sup>. Fernanda Maria Pereira Raupp

Rio de Janeiro  
Setembro de 2013

**Guina Guadalupe Sotomayor Alzamora**

**Estratégias de localização de hubs para o  
sistema de transporte aéreo brasileiro**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção do Departamento de Engenharia Industrial do Centro Técnico Científico da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Profª. Fernanda Maria Pereira Raupp**

Orientador

Departamento de Engenharia Industrial — PUC-Rio

**Prof. Nelio Domingues Pizzolato**

Departamento de Engenharia Industrial - PUC-Rio

**Prof. Marcia Helena Costa Fampa**

Departamento de Ciências da Computação - UFRJ

**Prof. Carlos Humes Jr**

Instituto de Matemática e Estatística - USP

**Prof. Marcus Vinucius Soledade Poggi de Aragão**

Departamento de Informática - PUC-Rio

**Prof. José Eugênio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico — PUC-Rio

Rio de Janeiro, 26 de Setembro de 2013

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

### **Guina Guadalupe Sotomayor Alzamora**

Graduou-se em Engenharia de Sistemas na Universidade Nacional del Altiplano em Puno, Peru, com ênfase em simulação de sistemas. Possui título de Mestrado em Engenharia de Sistemas e Computação pela Universidade Federal do Rio de Janeiro, na área de Computação Gráfica, com ênfase em simulação física e detecção de colisões.

#### Ficha Catalográfica

Sotomayor Alzamora, Guina Guadalupe

Estratégias de localização de hubs para o sistema de transporte aéreo brasileiro / Guina Guadalupe Sotomayor Alzamora; orientador: Fernanda Maria Pereira Raupp. — 2013.

115 f. : il. (color); 30 cm

1. Tese (doutorado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Industrial, 2013.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia Industrial – Teses. 2. Problema de localização de hubs. 3. Modelo da  $p$ -mediana. 4. Modelo da  $q$ -hub mediana. 5. Transporte aéreo. 6. Distribuição logística. I. Raupp, Fernanda Maria Pereira. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Industrial. III. Título.

CDD: 658.5

A meus pais Pedro e Domitila e meus irmãos Percy, Karina e Yemily pelo  
apoio incondicional, amo vocês.



## Agradecimentos

A Deus e a minha família, Pedro, Domitila, Percy, Karina e Yemily, pelo seu apoio incondicional, seu carinho, e por me fazerem sentir perto de vocês sempre.

Ao minha orientadora Professora Fernanda Maria Pereira Raupp pelo seu apoio, constante ajuda e paciência sempre presente no decorrer do doutorado.

Ao Professor Nelio Domingues Pizzolato, pelas suas conversas, sugestões, e ensinamentos no decorrer do doutorado.

À Professora Marcia Helena Costa Fampa, pelas sugestões e apoio no desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores Carlos Humes Jr. e Marcus Vinicius Soledade Poggi de Aragão, membros integrantes da comissão examinadora.

À CAPES e à universidade PUC-Rio, pelos auxílios concedidos sem os quais não teria sido possível desenvolver este trabalho.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Industrial, pela amizade, ajuda e apoio.

Aos meus amigos Ruben, Gladys, Raquel, Luis, Therezinha, Edgar, Orivalde, Daniela e Miguel, pelas pequenas ou grandes conversas, pela força, amizade e o incentivo no decorrer dos últimos anos.

A todas as demais pessoas que me apoiaram no decorrer do doutorado.

## Resumo

Sotomayor Alzamora, Guina Guadalupe; Raupp, Fernanda Maria Pereira. **Estratégias de localização de hubs para o sistema de transporte aéreo brasileiro**. Rio de Janeiro, 2013. 115p. Tese de Doutorado — Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O problema de localização de *hubs* visa encontrar pontos de concentração de fluxo numa rede, de modo que a soma das distâncias das ligações compartilhadas entre pontos da rede seja minimizada. Neste trabalho, o problema fundamental de localização de *hubs* com alocação simples para o sistema de transporte aéreo brasileiro é abordado, através da identificação de *hubs* regionais e *hubs* centrais, a fim de minimizar o fluxo na rede via a resolução primeiramente de um modelo integrado. A seguir, é proposto um método heurístico de duas fases em vista de reduzir o tempo de resposta e superar a limitação de memória. Na primeira fase da heurística proposta são identificados *hubs* regionais via resolução do modelo da  $p$ -mediana. Utilizando os resultados da primeira fase na segunda fase, procede-se à identificação de *hubs* centrais resolvendo-se o modelo  $q$ -hub-mediana numa rede de aeroportos menor, porém de mesmo fluxo de passageiros. Experimentos computacionais com as duas estratégias propostas para o problema de localização de *hubs* são realizados, tendo como instância base o sistema de transporte aéreo brasileiro com 150 aeroportos. Para estratégia via modelo integrado é considerado um total de 24 aeroportos no sistema, com o número de *hubs* regionais variando de 10 a 19 e o de *hubs* centrais variando de 2 a 6; para a estratégia via método heurístico é considerado um total de 150 aeroportos no sistema, com o número de *hubs* regionais variando de 10 a 40 na primeira fase, e o de *hubs* centrais variando de 2 a 6, na segunda fase. Ainda, recursos gráficos são usados na visualização dos resultados obtidos.

## Palavras-chave

Problema de localização de hubs; Modelo da  $p$ -mediana; Modelo da  $q$ -hub mediana; Transporte aéreo; Distribuição logística.

## Abstract

Sotomayor Alzamora, Guina Guadalupe; Raupp, Fernanda Maria Pereira (Advisor). **Hub location strategies for the Brazilian air transportation system**. Rio de Janeiro, 2013. 115p. PhD Thesis — Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The hub location problem aims to find points of concentration in a flow network, such that the sum of the distances of the connections shared between grid points is minimized. In this work, the fundamental problem of locating hubs with simple allocation for the Brazilian air transportation system is approached, by identifying regional and central hubs, in order to minimize the network flow by solving first an integrated model. Then, a two-phase heuristic method is proposed in order to reduce the response time and overcome the memory limitation. In the first phase of the proposed heuristic the regional hubs are identified through the resolution of the  $p$ -median model. Using the results of the first phase in the second one, the identification of central hubs is proceeded by solving a  $q$ -hub-median model in a smaller airport grid, but of the same passenger flow. Computational experiments with the two proposed strategies for the hub location problem are performed, having as basic instance the Brazilian air transportation system with 150 airports. For the integrated model strategy a total of 24 airports in the system is considered, with the number of regional hubs varying from 10 to 19 and the number of central hubs varying from 2 to 6; and for the heuristic method strategy a total of 150 airports in the system is considered, with the number of regional hubs varying from 10 to 40 in the first stage, and the number of central hubs varying from 2 to 6 in the second stage. Further, graphical features are used in the visualization of the results.

## Keywords

Hub location problem;  $p$ -median model;  $q$ -hub median model; Air transport; Logistics distribution .

## Sumário

1	Introdução	12
2	Transporte Aéreo	17
3	Problemas de localização	33
3.1	Introdução	33
3.2	Problemas de localização baseados no modelo da $p$ -mediana	37
3.3	Problemas de localização de <i>hubs</i>	39
3.4	Métodos de solução	46
4	Estratégias propostas	55
4.1	Estratégia Modelo integrado	56
4.2	Estratégia do método de duas fases	62
4.3	Comparação de resultados	68
5	Conclusões	80
6	Referências Bibliográficas	83
A	Dados aéreos	92

## Lista de figuras

2.1	Porcentagem de tráfego aéreo mundial segundo o número de passageiros transportados no mundo em 2011.	20
2.2	Fluxo de passageiros com menos de 10 mil passageiros entre os 150 aeroportos brasileiros atendidos em 2010.	24
2.3	Fluxo de passageiros com mais de 10 mil passageiros entre os 150 aeroportos brasileiros atendidos em 2010.	25
2.4	Fluxos de carga entre os 114 aeroportos brasileiros atendidos em 2010.	26
2.5	Porcentagem de passageiros transportados em voos domésticos no Brasil em 2010.	29
2.6	Volume de passageiros transportados em voos domésticos no Brasil com menos de 100 mil passageiros em 2010.	30
2.7	Volume de passageiros transportados em voos domésticos no Brasil com mais de 100 mil passageiros em 2010.	31
3.1	Triângulo locacional de Weber.	34
3.2	Caminhos alternativos entre a origem $i$ e o destino $j$ .	40
3.3	Rede totalmente interconectada vs rede com um <i>hub</i> .	40
3.4	Tipos de fluxo numa rede <i>hub-and-spoke</i> .	41
3.5	Redes de alocação múltipla (a) e alocação simples (b).	43
3.6	Métodos de solução exatos para o problema de localização de <i>hubs</i> .	53
3.7	Algoritmos heurísticos e metaheurísticas para o problema de localização de <i>hubs</i> .	54
4.1	Visualização do resultado do modelo integrado com $n = 24$ , 10 <i>hubs</i> regionais e 3 <i>hubs</i> centrais.	65
4.2	Ideia geral da primeira fase do método de duas fases.	66
4.3	Ideia geral da segunda fase do método de duas fases.	66
4.4	Visualização do resultado da primeira fase do método de duas fases para 150 aeroportos e 24 <i>hub</i> regionais.	69
4.5	Visualização do resultado da segunda fase do método de duas fases para 150 aeroportos, 24 <i>hubs</i> regionais e 3 <i>hubs</i> centrais.	70
4.6	Visualização do resultado da primeira fase do método de duas fases com $n = 24$ e a localização de 10 <i>hubs</i> regionais.	71
4.7	Visualização do resultado da segunda fase do método de duas fases com $n = 24$ , 10 <i>hubs</i> regionais e a localização de 3 <i>hubs</i> centrais.	72
4.8	Visualização do resultado da primeira fase do método de duas fases para $n = 24$ aeroportos atendidos por Avianca e 10 <i>hubs</i> regionais.	74
4.9	Visualização do resultado da segunda fase do método de duas fases para $n = 24$ aeroportos atendidos por Avianca, 10 <i>hubs</i> regionais e 3 <i>hubs</i> centrais.	79

## Lista de tabelas

2.1	Número de passageiros transportados no mundo nos anos 2002–2011.	18
2.2	Toneladas de carga transportadas no mundo nos anos 2002–2011.	19
2.3	Número de localidades atendidas por voos domésticos no Brasil em 2010.	23
2.4	As 10 rotas com maior fluxo de passageiros em voos domésticos no Brasil em 2010.	27
2.5	Número de passageiros transportados no Brasil nos anos 2002–2011.	28
2.6	Aeroportos com maior movimentação de passageiros transportados em voos domésticos no Brasil em 2010.	32
2.7	Aeroportos com maior movimentação de carga transportada em voos domésticos no Brasil em 2010.	32
3.1	Notação para diferentes tipos de Problemas de localização de <i>hubs</i>	47
4.1	Volume de passageiros por aeroporto.	59
4.2	Lista dos 24 aeroportos brasileiros usados no modelo integrado.	60
4.3	Resultados da estratégia do modelo integrado.	61
4.4	Localização de <i>hubs</i> regionais e suas alocações obtidas com a estratégia do modelo integrado com $p = 10$ .	62
4.5	Localização de <i>hubs</i> regionais e suas alocações obtidas com a estratégia do modelo integrado com $p = 19$ .	63
4.6	Localização de <i>hubs</i> centrais e suas alocações obtidas com a estratégia do modelo integrado com $p = 10$ e $q = 2, \dots, 6$ .	64
4.7	Localização de <i>hubs</i> centrais e suas alocações obtidas com a estratégia do modelo integrado com $p = 19$ e $q = 2, \dots, 6$ .	75
4.8	<i>Hubs</i> centrais localizados com a estratégia do modelo integrado com $p = 10$ e $p = 19$ <i>hubs</i> regionais e $q = 2, \dots, 6$ <i>hubs</i> centrais.	76
4.9	Resultados da estratégia do método de duas fases	76
4.10	<i>Hubs</i> centrais localizados com a estratégia do método de duas fases com $p = 10, \dots, 40$ <i>hubs</i> regionais e $q = 2, \dots, 6$ <i>hubs</i> centrais.	77
4.11	Resultados da segunda fase da estratégia do método de duas fases para $n = 24$ , $p = 10$ e $q = 2, \dots, 6$ <i>hubs</i> centrais.	77
4.12	Comparação do tempo de solução do modelo integrado versus método de duas fases.	77
4.13	Lista de aeroportos brasileiros atendidos pela empresa Avianca.	78
A.1	Lista dos 150 aeroportos e aeródromos atendidos pelo transporte aéreo brasileiro em voos domésticos de passageiros no ano 2010.	93
A.2	Lista dos 114 aeroportos e aeródromos atendidos pelo transporte aéreo brasileiro em voos domésticos de carga no ano 2010.	100
A.3	Localização de <i>hubs</i> regionais e suas alocações obtidas com a primeira fase da estratégia do método de duas fases com $n = 150$ e $p = 10$ <i>hubs</i> regionais.	106

A.4	Localização de <i>hubs</i> regionais e suas alocações obtidas com a primeira fase da estratégia do método de duas fases com $n = 150$ e $p = 19$ <i>hubs</i> regionais.	107
A.5	Localização de <i>hubs</i> regionais e suas alocações obtidas com a primeira fase da estratégia do método de duas fases com $n = 150$ e $p = 24$ <i>hubs</i> regionais.	108
A.6	Localização de <i>hubs</i> regionais e suas alocações obtidas com a primeira fase da estratégia do método de duas fases com $n = 150$ e $p = 34$ <i>hubs</i> regionais.	109
A.7	Localização de <i>hubs</i> regionais e suas alocações obtidas com a primeira fase da estratégia do método de duas fases com $n = 150$ e $p = 40$ <i>hubs</i> regionais.	110
A.8	Localização de <i>hubs</i> centrais e suas alocações obtidas com a segunda fase da estratégia do método de duas fases com $n = 150$ aeroportos, $p = 10$ <i>hubs</i> regionais e $q = 2, \dots, 6$ .	111
A.9	Localização de <i>hubs</i> centrais e suas alocações obtidas com a segunda fase da estratégia do método de duas fases com $n = 150$ aeroportos, $p = 19$ <i>hubs</i> regionais e $q = 2, \dots, 6$ .	112
A.10	Localização de <i>hubs</i> centrais e suas alocações obtidas com a segunda fase da estratégia do método de duas fases com $n = 150$ aeroportos, $p = 24$ <i>hubs</i> regionais e $q = 2, \dots, 6$ .	113
A.11	Localização de <i>hubs</i> centrais e suas alocações obtidas com a segunda fase da estratégia do método de duas fases com $n = 150$ aeroportos, $p = 34$ <i>hubs</i> regionais e $q = 2, \dots, 6$ .	114
A.12	Localização de <i>hubs</i> centrais e suas alocações obtidas com a segunda fase da estratégia do método de duas fases com $n = 150$ aeroportos, $p = 40$ <i>hubs</i> regionais e $q = 2, \dots, 6$ .	115

# 1

## Introdução

A demanda por transporte aéreo no mundo superou a marca de 2.738 milhões de passageiros em 2011. Desde 2002, o volume anual de passageiros tem aumento em média 5,1%. O crescimento do tráfego de passageiros reflete um crescimento econômico positivo no mundo inteiro e em todas as regiões. Segundo os cálculos de *IHS Global Insight*, uma importante organização de previsões econômicas mundiais, o produto interno bruto (PIB) real mundial incrementou-se 3,7% em 2011 (ICAO, 2012).

Neste cenário, muitas companhias aéreas possuem problemas no planejamento e na programação de voos de sua preferência; há muitos aeroportos com amplo volume de tráfego somente em horas pico, existem outros que trafegam perto da sua capacidade de uso durante muitas horas por dia, como são, por exemplo, os aeroportos Londres Heathrow e Frankfurt Alemanha, e outros que trabalham sem restrições de capacidade (Gelhausen et al., 2013). A questão é saber se tais restrições de capacidade nos aeroportos vão se tornar uma barreira para o futuro crescimento da demanda do sistema de transporte aéreo mundial. Caso a resposta seja positiva, tem-se que encontrar possíveis soluções para superar esta dificuldade.

Um estudo sobre as operações de um aeroporto específico, para o ano 2016, mostrou que aproximadamente 70% de voos com origem ou destino nesse aeroporto teriam pousos ou decolagens em outros aeroportos com restrições de capacidade. Observa-se então que a melhoria isolada da capacidade dos aeroportos não é suficiente para manter o ritmo de crescimento da demanda a nível mundial. As operações dos aeroportos devem ser analisadas em conjunto com as operações dos aeroportos da rede de conexões (Gelhausen et al., 2013).

A demanda brasileira anual por transporte aéreo apresentou uma média crescimento de 10,6%, muito superior à média mundial, entre os anos 2002 e 2011. Embora a tonelage de carga seja relativamente estável ao longo do período, o seu valor agregado tem aumentado. Em 2011, o número de passageiros superou a marca de 80 milhões em voos domésticos no Brasil, o que representa um amplo incremento sobre os 30 milhões de passageiros registrados em 2002, representando um aumento de 164% nesses últimos 10



anos, conforme a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) (ANAC, 2013).

No Brasil, a relação entre o incremento da demanda do transporte aéreo e o crescimento econômico tem sido discutido no âmbito acadêmico, empresarial e governamental. Marazzo *et al.* (Marazzo et al., 2010) indicam uma dissociação entre a demanda e o investimento em infraestrutura aeroportuária; os investimentos em infraestrutura não acompanham a demanda crescente por serviços confiáveis. Isto tem levado a gargalos operacionais e restrições de capacidade, podendo comprometer os fluxos de passageiros durante a Copa do Mundo (2014) e os Jogos olímpicos (2016), em que o Brasil é o país anfitrião (Wanke, 2012).

O valor econômico criado pelo sistema de transporte aéreo para um país é mais do que sua presença econômica no PIB e sua capacidade de geração de empregos juntamente com sua cadeia de suprimentos. Não apenas empregos estão ameaçados se políticas sobre o setor forem mal concebidas, mas o bem-estar dos cidadãos e a eficácia da infraestrutura fundamental para o sucesso em longo prazo do país nos mercados globais também está em risco (Oxford Economics, 2011).

Neste contexto, há desafios a serem enfrentados para servir à crescente demanda por serviços aeroportuários, uma vez que a infraestrutura aeroportuária que prevalece no Brasil é deficitária, sendo de senso comum que aeroportos mais movimentados enfrentam dificuldades com congestionamento e a maior parte deles não possui espaço físico disponível para expansão. Desta forma, a estratégia de inserção de *hubs* poderia melhorar a eficiência do sistema de transporte aéreo brasileiro.

A inserção de *hubs* num sistema de transporte aéreo requer a localização de *hubs* em uma rede conhecida de aeroportos, tratando-se de um problema específico de localização de facilidades, amplamente investigado na Pesquisa Operacional, para auxílio na tomada de decisões, com o objetivo de melhorar ou otimizar a performance do sistema.

Segundo Alumur e Kara (Alumur e Kara, 2008), *hubs* são instalações especiais, as quais servem como pontos de transbordo, troca e triagem de sistemas de distribuição, atuando como pontos de concentração, de importância ou de interesse numa determinada rede de fluxos. Assim, Contreras e Fernandez (Contreras e Fernandez, 2011) consideram que problemas de localização de *hubs* podem ser entendidos como problemas de projeto ou desenho de redes de fluxo, que são modelados, em geral, por uma variante do modelo clássico da *p*-mediana. Embora determinar instalações de *hubs* em uma rede assim como alocar clientes a estas instalações sejam tarefas complicadas (Farahani et al., 2013), seus resultados podem ser melhores que considerar conexões diretas em

toda a rede.

Dentre os possíveis usuários do sistema de transporte aéreo, o problema de localização de *hubs* é de interesse direto de setores governamentais à procura de alternativas de expansão futura da infraestrutura de aeroportos e do incremento da demanda para oferecer serviços de transporte, de companhias aéreas à procura de expansão e/ou melhor definição de *hubs*, e de usuários comuns que desejam fazer consultas sobre possíveis rotas para suas viagens.

Nesta tese, um projeto para o sistema de transporte aéreo brasileiro é apresentado via introdução de *hubs*. Seguindo a direção sugerida por Campbell e O’Kelly (Campbell e O’Kelly, 2012), o problema fundamental de localização de *hubs* com alocação simples para o sistema de transporte aéreo brasileiro é abordado, incorporando custos de transporte e medição de serviços mais realistas, através da identificação de *hubs* regionais e centrais, a fim de minimizar o fluxo na rede, via a resolução primeiramente de um modelo integrado. Em seguida, é proposto um método heurístico de duas fases em vista de reduzir o tempo de resposta e superar a limitação de memória. Tem-se como objetivo também fornecer um software que auxilie na tomada de decisões, utilize dados reais, e permita otimizar diferentes cenários em tempo razoável, utilizando alternativamente as duas estratégias propostas. O software proposto permite ainda visualizar a localização dos *hubs* e seus fluxos, exportar modelos, consultar rotas, entre outros aspectos.

Métodos de solução desenvolvidos para o problema de localização de *hubs* enfrentam dificuldades com o tamanho das instâncias, sendo uma característica dos problemas de otimização em redes de grande porte. A dificuldade se evidencia na limitada quantidade de memória dos computadores e no longo tempo de execução.

Baseado na ideia do método heurístico de duas fases de Figueiredo *et al.* (Figueiredo et al., 2012), o método heurístico proposto considera toda a rede de aeroportos na primeira fase a fim de identificar primeiramente os pontos de concentração de fluxo de pequenos aeroportos em regiões com baixo número de passageiros, chamados de *hubs* regionais. Para isso, resolve-se o modelo da  $p$ -mediana, em que o valor de  $p$  é fixado, a distância entre cada par de aeroportos é conhecida, assim como o fluxo de passageiros de cada par origem-destino. Após a identificação dos aeroportos de concentração regional de passageiros, agora com uma rede de aeroportos em número menor, mas mantendo o mesmo fluxo de passageiros, parte-se para a segunda fase do método em que aeroportos de maior concentração de passageiros, ou seja, *hubs* centrais são identificados com o auxílio do modelo de  $q$ -hub-mediana, fixando o valor de  $q$  e calculando *a priori* as distâncias entre os aeroportos e os *hubs* regionais e os fluxos de

passageiros da nova rede, considerando ainda os trajetos de origem e/ou destino não finalizados.

Experimentos computacionais com as duas estratégias propostas para o problema de localização de *hubs* são realizados, tendo como instância base o sistema de transporte aéreo brasileiro com 150 aeroportos, com suas localizações geográficas (latitude e longitude) e fluxos de passageiros em voos domésticos conhecidos segundo ANAC (ANAC, 2011). Observa-se que muitos desses aeroportos não têm um volume significativo de tráfego nem boa infraestrutura em termos de terminais de passageiros. Para a estratégia via modelo integrado é considerado um total de 24 aeroportos no sistema, com o número de *hubs* regionais variando de 10 a 19 e o de *hubs* centrais variando de 2 a 6; para a estratégia via método heurístico é considerado um total de 150 aeroportos no sistema, com o número de *hubs* regionais variando de 10 a 40 na primeira fase, e o de *hubs* centrais variando de 2 a 6, na segunda fase.

A escolha do número de aeroportos candidatos a serem *hubs* regionais e centrais é feita baseada no fluxo mínimo de passageiros de voos domésticos anual. Como estudado por Costa *et al.* (Costa et al., 2010), o número de *hubs* no sistema de transporte aéreo brasileiro deve ser de 3 a 6 devido à adequação do grau de agrupamento de aeroportos na rede.

Os modelos matemáticos da *p*-mediana e de *q-hub*-mediana, assim como o modelo integrado proposto, foram resolvidos com o software CPLEX, versão 12.4 disponível no pacote AIMMS versão 12.1. No software de visualização proposto, recursos gráficos são usados juntamente com a técnica de diagrama de Voronoi para visualizar a rede de aeroportos com *hubs* inseridos.

Assim, em relação à literatura acadêmica, esta tese se diferencia nos seguintes aspectos:

- Resolve-se o problema fundamental de localização de *hubs*, proposto originalmente por Campbell (Campbell, 1994). Nesse problema não se considera viagens diretas, toda viagem inclui pelo menos um *hub* regional e no máximo dois *hubs* centrais, sendo que os *hubs* possuem alocação simples.
- Os aeroportos que concentram o fluxo regional de passageiros são integrados aos aeroportos que concentram o fluxo central de passageiros no sistema, considerando ainda todos os fluxos de origem e/ou destino não finalizados.
- Propõe-se um modelo matemático que integra a decisão de localização de *hubs* centrais e regionais visando a minimização das distâncias-tempos.

- Propõe-se um método de solução de duas fases para resolver o problema fundamental de localização de *hubs* com alocação simples.
- Diversos cenários podem ser criados através do software proposto, assim, respeitando-se alguns critérios, o número de *hubs* regionais, *hub* centrais e fator de desconto podem ser calibrados. A distância pode ser do tipo euclidiana ou esférica, assim como o uso ou não de peso ou demanda também podem ser definidos *a priori* pelo usuário.

A tese está organizada da seguinte forma. No Capítulo 2 é apresentado um panorama geral do transporte aéreo mundial e brasileiro. No Capítulo 3 são apresentados conceitos teóricos básicos referentes ao problema de localização em geral, e especificamente ao problema de localização de *hubs*, assim como são expostos os métodos de solução existentes. As estratégias de localização de *hubs* são apresentadas no Capítulo 4. Nele, são apresentados o modelo matemático proposto para localizar *hubs* centrais e regionais de forma integrada assim como o método heurístico proposto, juntamente com experimentos numéricos realizados com ambas estratégias. Finalmente, no Capítulo 5, as conclusões deste trabalho de pesquisa e as perspectivas de continuação são apresentadas.

## 2

### Transporte Aéreo

Neste capítulo, o transporte aéreo mundial, assim como o brasileiro, é abordado em linhas gerais. Tem-se a noção da importância do transporte aéreo no Brasil em termos econômicos segundo dados fornecidos por instituições oficiais ligadas ao setor.

O transporte aéreo realiza o deslocamento de pessoas e cargas pelo ar, diminuindo a distância-tempo ao percorrer rapidamente longas distâncias, independente da origem ou do destino. Rápido, cômodo e seguro, suplantou outros meios de transporte de passageiros de médias a longas distâncias obtendo um significativo crescimento nas últimas décadas, com destaque para o transporte de pessoas.

O uso deste meio de transporte implica na construção de estruturas especiais como são os aeródromos. Um aeródromo é toda área que possui infraestrutura destinada à aterrissagem, decolagem e à movimentação de aeronaves. No entanto, um aeroporto é um aeródromo público que possui instalações e facilidades para apoio de operações de aeronaves e para embarque e desembarque de pessoas e cargas.

Os custos de manutenção da infraestrutura aeroportuária e das aeronaves são elevados, mas, com a modernização dos aeroportos e/ou aeródromos, dos aviões e a competição entre as companhias, melhorou-se o nível de serviço de transporte de passageiros e se obteve uma maior acessibilidade, devido à redução dos preços das passagens, gerando maior demanda. No entanto, o transporte aéreo de cargas possui um elevado custo decorrente da incapacidade de deslocamentos de grandes volumes. Assim, a distribuição logística de cargas leves e produtos perecíveis é feita preferencialmente via transporte aéreo ou quando é necessário agilidade no transporte de itens.

No ano 2011, mais de 2.738 milhões de pessoas viajaram por avião no mundo inteiro, segundo o informe anual da Organização da Aviação Civil Internacional (OACI), conhecida por sua sigla em inglês ICAO, que reúne dados fornecidos pelas companhias aéreas de seus 191 estados membros, significando um aumento de 5,6% com relação ao ano de 2010. Na Tabela 2.1 é apresentado o total de tráfego aéreo mundial, em milhões de passageiros, em

voos internacionais e domésticos, dos serviços regulares das companhias aéreas dos estados membros da ICAO, correspondentes aos anos 2002–2011, assim como a variação do incremento anual, com isto, corrobora-se um aumento de passageiros de 5,1% considerando os últimos 10 anos.

Tabela 2.1: Número de passageiros (em milhões) transportados no mundo nos anos 2002–2011.

Ano	Número de passageiros	Incremento anual
2002	1.665	-0,1%
2003	1.719	3,2%
2004	1.918	11,6%
2005	2.054	7,1%
2006	2.169	5,6%
2007	2.360	8,8%
2008	2.395	1,5%
2009	2.385	-0,4%
2010	2.593	8,7%
2011	2.738	5,6%

Fonte: ICAO (ICAO, 2012).

Na Tabela 2.2 é apresentado o total de transporte de carga mundial em milhões de toneladas, em voos internacionais e domésticos, dos serviços regulares das companhias aéreas dos estados membros da ICAO, correspondentes aos anos 2002–2011, assim como a variação do incremento anual, com isto, corrobora-se um aumento de transporte de carga de 5,6% considerando os últimos 10 anos.

A distribuição regional do tráfego aéreo no ano 2011, que inclui os serviços internacionais e domésticos das companhias aéreas dos países membros da ICAO, é apresentada na Figura 2.1, em que se observa a porcentagem de tráfego aéreo mundial correspondente a cada região no mundo em milhões de passageiros transportados. Observa-se que na região Ásia e Pacífico foram transportados mais de 816 milhões de passageiros, explicado possivelmente pelo aumento do mercado interno na China de aproximadamente 11,7% no referido ano; em seguida tem-se a região da América do Norte com mais de 800 milhões de passageiros, sendo esse o mercado interno maior do mundo, porém, com cifras de crescimento menores, o que confirma a madurez deste mercado; a região da Europa transporta mais de 751 milhões de passageiros; as regiões da América Latina e Caribe transportam mais de 182 milhões, correspondendo a 6,7% da porcentagem mundial; Oriente Médio mais de 125 milhões; e finalmente a África tem mais de 61 milhões de passageiros transportados a nível mundial.

Tabela 2.2: Toneladas de carga (em milhões) transportadas no mundo nos anos 2002–2011.

Ano	Toneladas de carga	Incremento anual
2002	32,8	9,0%
2003	35,0	6,7%
2004	38,4	9,6%
2005	39,4	2,5%
2006	41,8	6,2%
2007	44,4	6,2%
2008	42,9	-3,2%
2009	42,6	-0,8%
2010	50,7	19,2%
2011	51,4	1,4%

Fonte: ICAO (ICAO, 2012).

Segundo dados da ANAC (ANAC, 2013), 99 milhões de passageiros foram transportados, considerando voos domésticos e voos internacionais que tiveram como origem ou destino o Brasil, no ano 2011. Contrastando estes dados com os da ICAO (ICAO, 2012), este valor representa 55% de passageiros transportados na América Latina e Caribe, e 4% de passageiros transportados a nível mundial, mostrando a importância do transporte aéreo brasileiro.

Um estudo do setor de transporte aéreo brasileiro revela que desde 1927, ano do voo inaugural da primeira companhia de aviação no Brasil, a aviação civil brasileira passou por inúmeras transformações, passando a ter um setor com empresas ou companhias de porte e marco regulatório definidos, contando, inclusive, com uma agência reguladora dedicada: a ANAC, criada no ano 2005, que, além de apontar perspectivas para o setor, analisa as limitações da infraestrutura brasileira, com grande ênfase na falta de capacidade dos aeroportos brasileiros (McKinsey, 2010).

Além disso, a ANAC compara os dados dos formulários da HOTRAN (Horário de Transporte), que contém todas as operações regulares previstas, com os dados da BAV (Boletim de Alteração de Voo), que registra eventuais alterações das operações regulares previstas, ou seja, entre aquilo que foi planejado pelas empresas e o que foi efetivamente operado, e apresenta estes dados num anuário de transporte aéreo. Nesse anuário, a ANAC também apresenta os dados provenientes das operações domésticas e internacionais das empresas aéreas brasileiras e estrangeiras que prestam serviços no Brasil, tais como passageiros e cargas transportados, localidades atendidas, entre outros. Estas e outras informações estão disponíveis na seção “Dados e Estatísticas” no site da ANAC na internet: [www.anac.gov.br](http://www.anac.gov.br) (ANAC, 2013), e servem para

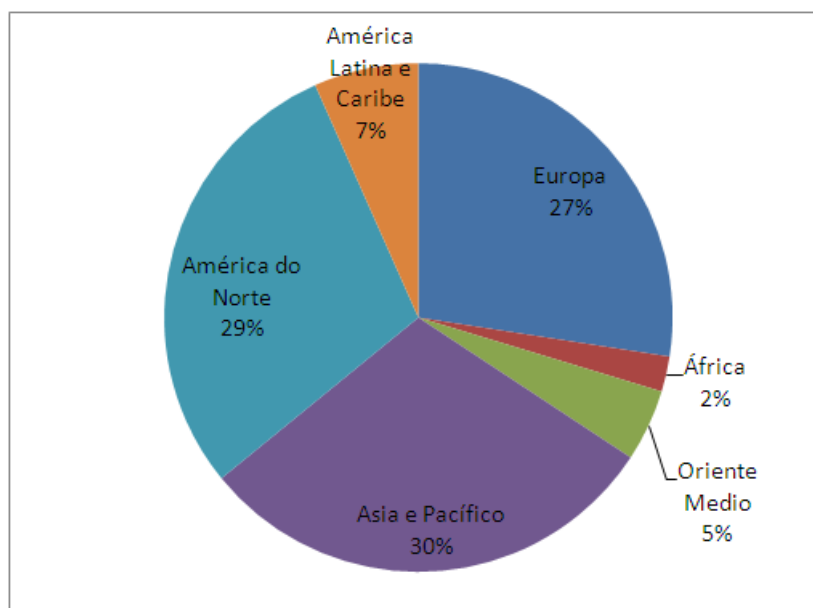


Figura 2.1: Porcentagem de tráfego aéreo mundial segundo o número de passageiros transportados no mundo em 2011.

Fonte: ICAO (ICAO, 2012).

atividades de análise e planejamento, e desenvolvimentos de estudos que possam contribuir para a evolução e modernização do setor de transporte aéreo.

Segundo Oxford Economics (Oxford Economics, 2011), o transporte aéreo no Brasil cria três tipos de benefícios tangíveis e intangíveis: presença econômica, medida pela contribuição do PIB, emprego e receitas fiscais geradas pelo setor e sua cadeia de suprimentos; atendimento da demanda de clientes e cargas que usam o transporte aéreo; e conexões entre cidades e mercados, permitindo a criação de clusters de negócios, investimentos estrangeiros diretos, especialização e outros impactos sobre a demanda produtiva da economia nessas cidades.

Dentre os benefícios econômicos do sistema de transporte aéreo brasileiro tem-se:

- participação relevante na economia do país, representando 1% do PIB brasileiro, com impacto total de 32 bilhões de reais, adicionalmente 9,9 bilhões em benefícios são estimulados através do turismo, que eleva a contribuição global do PIB para 1,3%;
- gera 684 mil empregos diretos no Brasil e 213 mil empregos indiretos no setor de transporte aéreo e em sua cadeia de suprimentos; e mais de 254 mil empregos são estimulados secundariamente pelo transporte aéreo, como por exemplo, o turismo;



- por ter tecnologia de capital intensivo, trata-se de um setor que demanda mão-de-obra altamente qualificada, que precisa de uma estrutura permanente de geração e qualificação de pessoal (Salgado et al., 2010);
- paga 5,3 bilhões em impostos, estima-se um adicional de 4,4 bilhões de receita do governo, através da cadeia de suprimento do setor de transporte aéreo e 2,8 bilhões por meio da tributação das atividades apoiadas pelos gastos dos empregados, tanto ao setor de transporte aéreo quanto a sua cadeia de suprimentos;
- no âmbito tecnológico, sua interação com a indústria aeronáutica nacional é uma das causas responsáveis pelo estímulo à inovação com respeito ao desenvolvimento de novos produtos (aeronaves e equipamentos) e métodos de gerência (logística, tomada de decisão, simulações) (Lovadine, 2009). Assim, a indústria aeroespacial gera 97.000 empregos e contribui em 4,3 bilhões de reais para PIB brasileiro;
- encontra-se num dos setores da economia com alto grau de vulnerabilidade a choques externos, como a variação do preço do barril de petróleo e pelas flutuações cambiais, dado que parte dos custos operacionais está atrelada ao dólar, o qual gera pressões altistas nos preços das viagens domésticas quando ocorrem desvalorizações da taxa de câmbio da moeda nacional (ANAC, 2013).

De acordo com Oxford Economics (Oxford Economics, 2011), no ano de 2010, havia 363 rotas que ligavam os maiores aeroportos do Brasil a aglomerações urbanas no mundo inteiro. Em média havia pouco mais de 5 vôos de ida por dia ao longo dessas rotas. Um total de 94 dessas rotas estavam conectando o Brasil a cidades com mais de 10 milhões de habitantes, com uma média de 7 voos por dia disponíveis para passageiros.

Muitas dessas conexões entre cidades são possíveis com o aumento da densidade de tráfego fornecida em aeroportos concentradores, ou alguns aeroportos centrais, ou seja, com a introdução de *hubs*. Assim, pode-se dizer que a integração brasileira na rede de transporte aéreo global transforma as possibilidades da economia brasileira por:

- Abrir mercados estrangeiros para as exportações brasileiras, Por exemplo, o tráfego internacional de carga e passageiros é visto como fator de reforço à inserção do país no contexto internacional, fortalecendo suas posições geopolíticas e laços comerciais, assim como a recepção de turistas internacionais, fonte de crescimento e desenvolvimento.

- Reduzir os custos de transporte, especialmente em longas distâncias, ajudando a incrementar a concorrência, uma vez que fornecedores podem servir uma ampla área e potencialmente reduzir a média de custos, através do aumento das economias de escala.
- Aumentar a flexibilidade da oferta de trabalho, introduzindo eficiência de alocação e derrubando a taxa natural de desemprego.
- Incentivar empresas brasileiras a investir e se especializar em áreas que desempenham as forças da economia.
- Acelerar a adoção de novas práticas de negócios, como por exemplo, a gestão *just-in-time* e criação de parcerias com fornecedores de itens e serviços.
- Incrementar produtividade e conseqüentemente a capacidade de fornecimento a longo prazo da economia. Estima-se que uma melhoria de 10% em conectividade em relação ao PIB veria um aumento por ano de 2 bilhões de reais no PIB a longo prazo para a economia brasileira.

Com uma extensão territorial de 8,5 milhões de quilômetros quadrados, aglomerando mais de cinco mil municípios, o Brasil, tem necessidade constante de reforçar a integração entre suas regiões geo-políticas. Possui o segundo maior número de aeródromos no mundo inteiro, atrás apenas dos Estados Unidos, porém, apesar de o sistema de transporte aéreo possuir mais de 2.500 aeródromos civis, entre públicos e privados, seu serviço alcança menos de duzentos municípios, segundo dados da ANAC (ANAC, 2013).

Dentre os aeródromos públicos no Brasil, 63 são administrados pela Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária (INFRAERO), com 67% de atuação no mercado (INFRAERO, 2012), 189 são administrados por estados, 156 por municípios, 306 por militares (Comaer) e 18 estão autorizados e/ou cedidos (McKinsey, 2010); destes últimos, no ano 2012, tornaram-se concessão a empresas privadas três aeroportos: Governador André Franco Montoro em Guarulhos - SP, Viracopos em Campinas - SP, e Presidente Juscelino Kubitschek em Brasília - DF.

A Tabela 2.3 apresenta o número de localidades atendidas por cada companhia aérea que forneceu serviço de transporte de passageiros e de carga no sistema de transporte aéreo doméstico brasileiro no ano 2010. Segundo a ANAC, para que uma localidade seja considerada como atendida por uma dada companhia aérea, devem existir mais de 100 voos remunerados, sejam eles regulares, extras, charter ou fretamento, no ano em questão, com origem naquela localidade (ANAC, 2013).

Tabela 2.3: Número de localidades atendidas por voos domésticos no Brasil em 2010.

Companhias aéreas	Localidades atendidas
TRIP	78
GOL VRG linhas aéreas	49
TAM	44
AZUL	24
AVIANCA	19
PASSAREDO	19
PANTANAL	17
SETE LINHAS AÉREAS	17
NHT	14
WEBJET	14
VARIG LOG	7
META	6
RIO LINHAS AÉREAS	6
TOTAL	6
ABSA	5
AIR MINAS	5
NOAR	5
TEAM	4
ABAETÉ	3
MASTER TOP	3
PUMA AIR	3
MEGA	2
SOL	2
RICO	1

Fonte: ANAC (ANAC, 2011).

As Figuras 2.2 e 2.3 mostram o fluxo de passageiros entre cada localidade de origem e destino que registra pelo menos uma decolagem para transporte doméstico de passageiros no ano de 2010. Nestas Figuras, os 150 aeródromos atendidos por alguma companhia brasileira concessionária são mostrados em cor vermelho, e as rotas que representam o total de 1.736 fluxos entre aeródromos dessas localidades são mostradas por linhas em gradiente de cor verde, fluxos menores têm uma tonalidade mais clara e fluxos maiores têm uma tonalidade mais escura (ANAC, 2011).

Na Figura 2.2, são mostrados os 1197 fluxos com menos de 10 mil passageiros: 473 fluxos registraram entre mil e 10 mil passageiros, 364 fluxos registraram entre 100 e mil passageiros, e 360 fluxos registraram entre 1 e 100 passageiros.

Na Figura 2.3, são mostrados os 539 fluxos com mais de 10 mil passagerei-

ros, os maiores fluxos de passageiros são dados entre os aeroportos Congonhas (SBSP) em São Paulo - SP e Santos Dumont (SBRJ) no Rio de Janeiro - RJ, com 1.842.792 passageiros no fluxo SBSP–SBRJ e 1.802.915 passageiros no fluxo SBRJ–SBSP. Dentre os 539 fluxos, 25 fluxos registraram entre 500 mil e um milhão de passageiros, 176 fluxos registraram entre 100 mil e 500 mil passageiros, e 336 fluxos registraram entre 10 mil e 100 mil passageiros. Estes fluxos representam mais do 95% de volume total de passageiros.

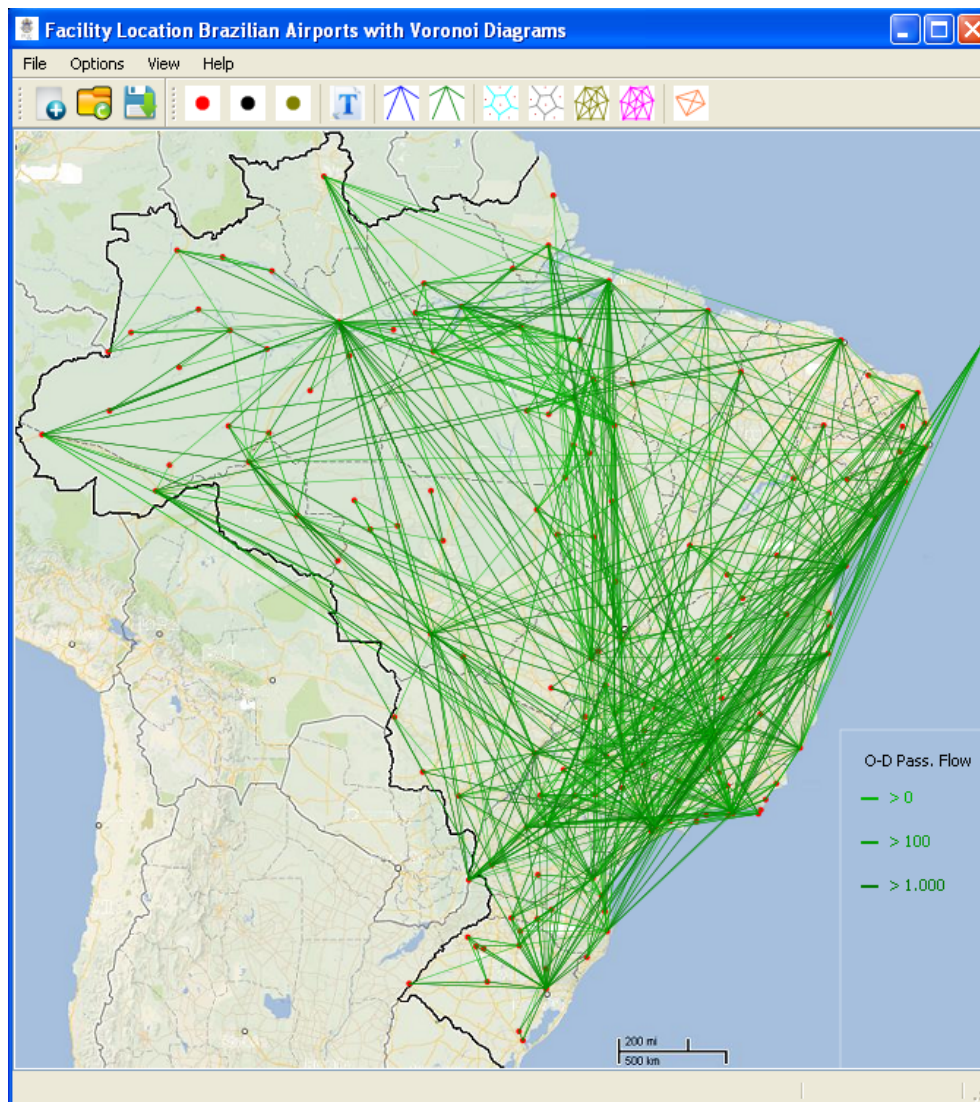


Figura 2.2: Fluxo de passageiros com menos de 10 mil passageiros entre os 150 aeroportos brasileiros atendidos em 2010.

Fonte: ANAC (ANAC, 2011).

A Figura 2.4 mostra o fluxo de carga entre localidades brasileiras, que registram pelo menos uma decolagem para transporte de carga no ano 2010. Os 114 aeródromos atendidos por alguma companhia brasileira concessionária são mostrados em cor vermelha, e as rotas que representam o total de 1.088 fluxos entre aeródromos dessas localidades são representadas por linhas em

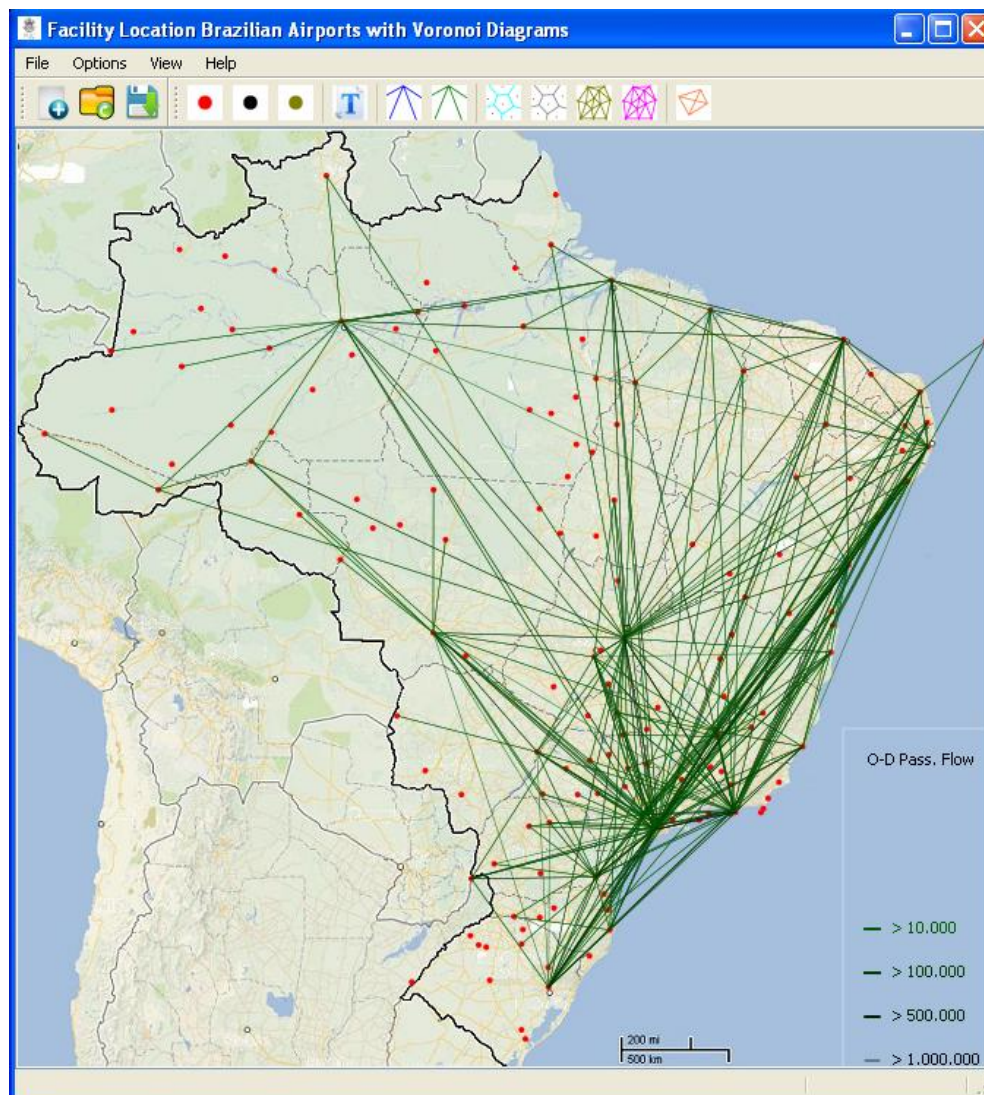


Figura 2.3: Fluxo de passageiros com mais de 10 mil passageiros entre os 150 aeroportos brasileiros atendidos em 2010.  
Fonte: ANAC (ANAC, 2011).

gradiente de cor verde, fluxos menores possuem uma tonalidade mais clara e fluxos maiores possuem tonalidade mais escura.

Os maiores fluxos de carga são dados entre os aeroportos de Eduardo Gomes (SBEG) em Manaus - AM e Governador André Franco Montoro (SBGR) em Guarulhos - SP, com 51.012 toneladas de carga transportada no fluxo SBEG-SBGR e 48.277 toneladas de carga transportada no fluxo SBGR-SBEG, 4 fluxos registraram entre 10.00 mil e 50.000 mil toneladas de carga, 88 fluxos registraram entre 1.000 mil e 10.000 mil toneladas de carga, 70 fluxos registraram entre 500 e 1.000 mil toneladas de carga, 202 fluxos registraram entre 100 e 500 toneladas de carga, 201 fluxos registraram entre 10 e 100 toneladas de carga, 153 fluxos registraram entre 1 e 10 toneladas de carga, 223 fluxos registraram entre 0,1 e 1 tonelada de carga e 146 fluxos registraram



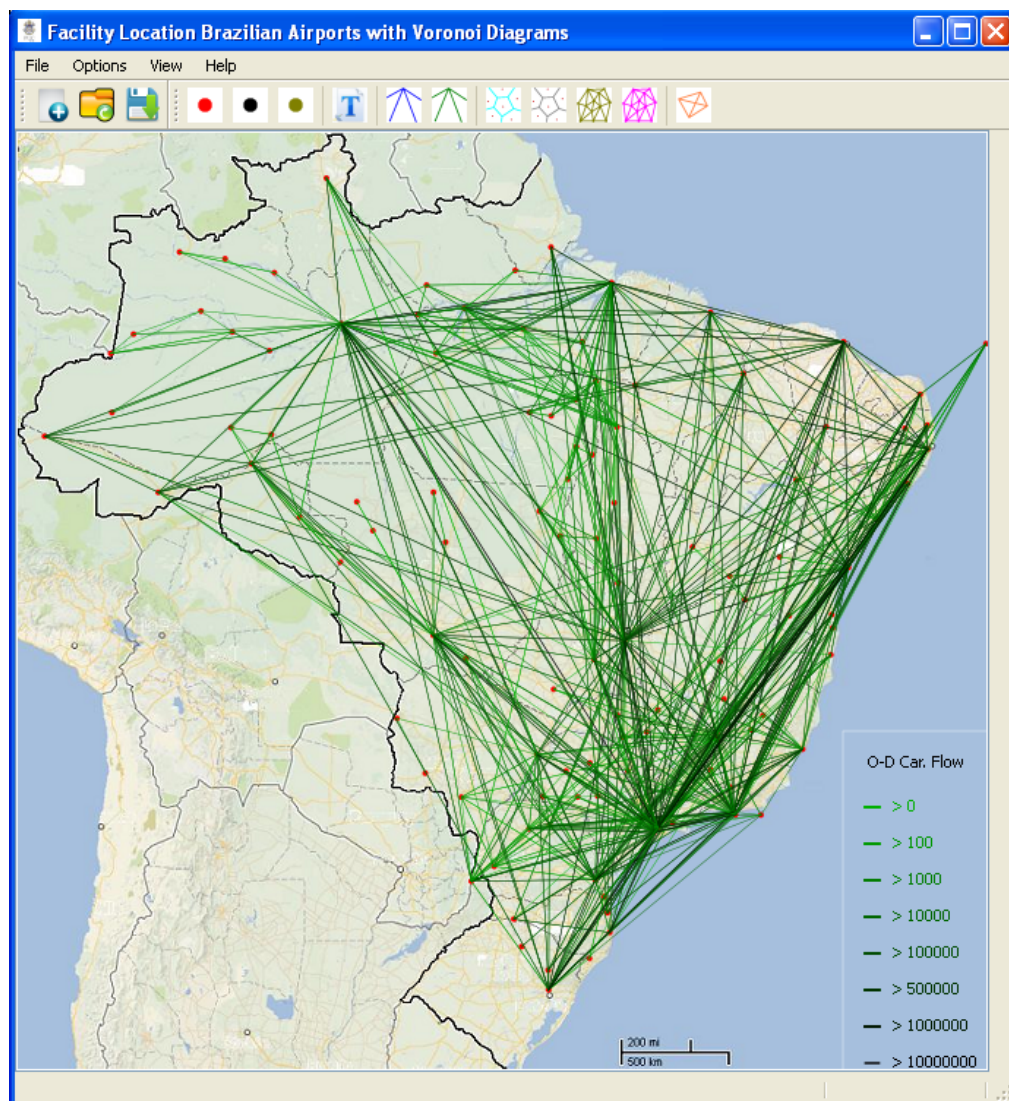


Figura 2.4: Fluxos de carga entre os 114 aeroportos brasileiros atendidos em 2010.

Fonte: ANAC (ANAC, 2011).

entre 0,001 e 0,1 tonelada de carga (ANAC, 2011).

Na Tabela 2.4, os 10 principais fluxos no mercado doméstico de passageiros no Brasil são apresentados, todos sob a jurisdição da INFRAERO no ano 2010. O valor apresentado para cada rota refere-se o somatório dos passageiros transportados nos dois sentidos, ou seja, passageiros embarcados no aeroporto A e desembarcados no aeroporto B e passageiros embarcados no aeroporto B e desembarcados no aeroporto A (ida e volta). O fluxo Congonhas (SBSP) em São Paulo - SP e Santos Dumont (SBRJ) no Rio de Janeiro - RJ continua sendo o mais requisitado, com um incremento de 23% desde o ano 2007, 1.842.792 passageiros tiveram como origem de viagem Rio de Janeiro, e 1.802.915 passageiros tiveram como origem de viagem São Paulo. Este fluxo recebe quase o dobro de passageiros que o segundo colocado, Governador André Franco Mon-

toro (SBGR) em Guarulhos - SP e Deputado Luis Eduardo Magalhães (SBSV) em Salvador - BA, com um total de 1.863.651 passageiros. Nota-se que SBSP e SBGR em São Paulo - SP, já vêm atuando como *hubs* principais no mercado doméstico do país (ANAC, 2011).

Tabela 2.4: As 10 rotas com maior fluxo de passageiros em voos domésticos no Brasil em 2010.

Rota		Passageiros
De:	A:	
SBSP em São Paulo - SP	SBRJ no Rio de Janeiro- RJ	3.645.707
SBGR em Guarulhos - SP	SBSV em Salvador - BA	1.863.651
SBSP em São Paulo - SP	SBBR em Brasília - DF	1.845.071
SBGR em Guarulhos - SP	SBRF em Recife - PE	1.552.777
SBGR em Guarulhos - SP	SBPA em Porto Alegre - RS	1.460.938
SBSP em São Paulo - SP	SBCF em Confins - MG	1.393.370
SBSP em São Paulo - SP	SBCT em Curitiba - PR	1.186.181
SBGR em Guarulhos - SP	SBBR em Brasília - DF	1.161.351
SBSP em Congonhas - SP	SBPA em Porto Alegre - PR	1.158.266
SBGR em Guarulhos - SP	SBFZ em Fortaleza - CE	1.105.119

Fonte: ANAC (ANAC, 2011).

Segundo a ANAC (ANAC, 2011), em 2010 foram transportados mais de 70 milhões de passageiros na rede brasileira de aeroportos, equivalendo a mais de 128 milhões de movimentos aeroportuários domésticos. Considerando também o transporte internacional, ao todo foram transportados mais de 85 milhões de passageiros, equivalendo a mais de 193 milhões de movimentos aeroportuários. Também, mais de 87 mil toneladas de carga foram movimentadas de e para o Brasil. Assim, no mercado doméstico, houve mais de um milhão de vôos conectados entre aeroportos do Brasil. Cabe destacar que 86% dos passageiros são residentes brasileiros.

A Tabela 2.5 mostra o total de passageiros transportados por companhias brasileiras e estrangeiras de transporte aéreo regular de 2002 a 2011. Um voo é considerado como doméstico se tem como origem e destino o Brasil e, um voo é considerado como internacional se tem Brasil só como origem ou destino (ANAC, 2013). Estes dados constataam que a média de aumento no número de passageiros cresceu 10,6% anualmente, nos últimos dez anos, na esteira da melhoria da economia como um todo, sendo o crescimento do PIB de 3,78% no mesmo período (IBGE, 2013).

No Brasil, 20 companhias aéreas forneceram dados sobre evolução anual de passageiros transportados em voos domésticos em 2010. A Figura 2.5 mostra a fatia de mercado doméstico para as principais companhias aéreas, onde GOL

Tabela 2.5: Número de passageiros transportados no Brasil nos anos 2002–2011.

ano	voos domésticos	voos internacionais	total
2002	30.997.593	7.319.535	38.317.128
2003	29.108.811	8.093.938	37.202.749
2004	32.069.776	9.143.624	41.213.400
2005	38.703.462	10.410.244	49.113.706
2006	43.162.852	10.848.716	54.011.568
2007	47.265.402	12.409.846	59.675.248
2008	49.857.578	13.664.250	63.521.828
2009	56.891.532	12.833.993	69.725.525
2010	70.006.559	15.512.925	85.519.484
2011	82.049.177	17.892.320	99.941.497

Fonte: ANAC (ANAC, 2013).

e TAM representam 80% do mercado, enquanto que Webjet e Azul, possuem 11% do mercado. Isto mostra uma redução da participação do mercado das primeiras companhias, visto que elas possuíam 93% do mercado em 2008 (ANAC, 2011).

Considerando os 150 aeroportos brasileiros que foram origem ou destino no ano 2010, as Figuras 2.6 e 2.7 apresentam os aeroportos com volume de passageiros em voos domésticos com menos e com mais de 100 mil passageiros, respectivamente. Cada aeroporto é representado por um quadrado verde com tamanho e cor proporcionais ao seu volume de passageiros; aeroportos com volumes menores possuem tamanhos menores e tonalidades mais claras e aeroportos com volumes maiores possuem tamanhos maiores e tonalidades mais escuras (ANAC, 2011). Essas figuras mostram a distribuição geográfica de aeroportos brasileiros de pequeno e grande porte.

Segundo o relatório de McKinsey (McKinsey, 2010), o crescimento expressivo da demanda não foi acompanhado no mesmo ritmo pelo desenvolvimento da infraestrutura aeroportuária, cuja administração fica majoritariamente a cargo da INFRAERO, com 66 aeroportos sob sua administração em 2010, sendo responsável por mais de 95% do tráfego aéreo civil nesse ano.

Segundo Barat (Barat, 2010), o sistema aeroportuário necessita de: (i) um adequado planejamento de longo prazo para o sistema de aviação civil como um todo; (ii) políticas públicas consistentes; (iii) marcos legal e regulador mais condizentes com o novo ambiente competitivo; e (iv) superar as deficiências em infraestrutura aeroportuária e aeronáutica. O relatório ainda pondera que não há definição clara de estratégias para a aviação brasileira nos próximos trinta anos e, sobretudo, não se têm políticas e regras de regulação econômica



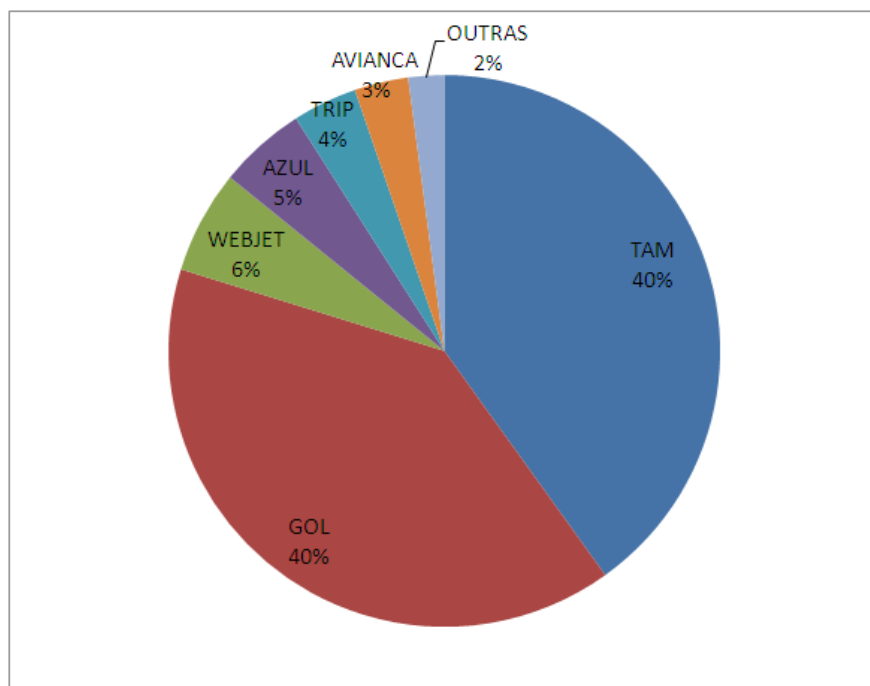


Figura 2.5: Porcentagem de passageiros transportados em voos domésticos no Brasil em 2010.

Fonte: ANAC (ANAC, 2011).

que balizem a evolução dos mercados internacional, doméstico e regional.

De acordo com McKinsey (McKinsey, 2010), os principais aeroportos brasileiros trabalharão acima de suas capacidades num futuro próximo, indicando uma falha de planejamento estratégico em infraestrutura de transporte aéreo. Existem ainda dificuldades de execução, o trabalho cita que o plano de investimentos da INFRAERO (base 2006) não pode ser executado como previsto, gerando pressão na infraestrutura existente. Obras não finalizadas geram áreas vazias nos aeroportos, e algumas vezes terminam sobrecarregando terminais adjacentes. O pior caso situa-se no aeroporto internacional Governador André Franco Montoro em Guarulhos - SP que, após uma recente ampliação, tem a capacidade de 20 milhões de passageiros, porém recebeu mais de 26 milhões de passageiros no ano 2012 (INFRAERO, 2012).

A Tabela 2.6 apresenta a quantidade de passageiros embarcados e desembarcados nos dez aeroportos de maior movimento de passageiros, considerando-se o ano 2010 (ANAC, 2011). O valor apresentado para cada aeroporto A refere-se ao somatório de passageiros embarcados na localidade A e desembarcados na localidade B e passageiros embarcados na localidade B e desembarcados na localidade A.

A Tabela 2.7 apresenta a quantidade de carga transportada por companhias brasileiras nos dez aeroportos de maior movimento de carga no ano 2010 (ANAC, 2011). O valor apresentado para cada aeroporto A refere-se



Figura 2.6: Volume de passageiros transportados em voos domésticos no Brasil com menos de 100 mil passageiros em 2010.

Fonte: ANAC (ANAC, 2011).

ao somatório de carga transportada da localidade A à localidade B e carga transportada da localidade B à localidade A.

Embora o último anuário disponível sobre informações do sistema aéreo brasileiro refere-se ao ano de 2011 (ANAC, 2013), nesta pesquisa foram utilizados os dados correspondentes ao ano de 2010. Esta limitação se deve à falta de informação sobre o tráfego doméstico por origem e por destino no mais recente anuário. Por exemplo, sabe-se que 168 aeródromos e/ou aeroportos foram atendidos com pelo menos uma decolagem, 18 a mais do que no ano 2010, mas não se possui informação sobre o número de passageiros que tiveram como destino esses aeródromos e/ou aeroportos, tampouco sobre os aeroportos de origem.

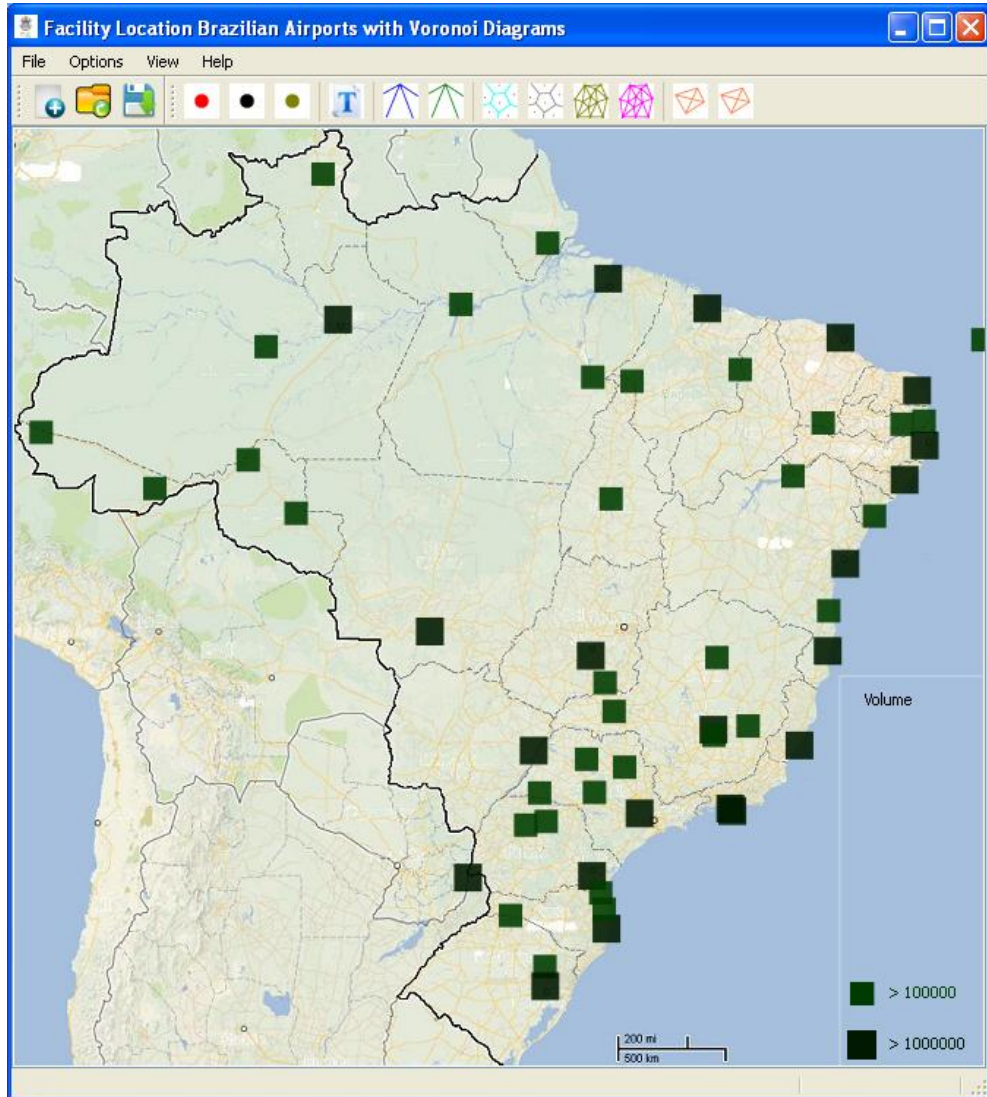


Figura 2.7: Volume de passageiros transportados em voos domésticos no Brasil com mais de 100 mil passageiros em 2010.

Fonte: ANAC (ANAC, 2011).

Tabela 2.6: Aeroportos com maior movimentação de passageiros transportados em voos domésticos no Brasil em 2010.

Aeroporto	Passageiros
SBGR em Guarulhos - SP	16.621.797
SBSP em São Paulo - SP	15.586.566
SBBR em Brasília - DF	14.515.783
SBGL no Rio de Janeiro - RJ	9.319.685
SBSV em Salvador - BA	7.819.472
SBRJ no Rio de Janeiro - RJ	7.775.364
SBCF em Confins - MG	6.983.813
SBRF em Recife - PE	6.089.052
SBPA em Porto Alegre - PR	6.032.031
SBCT em Curitiba - PR	5.869.523

Fonte: ANAC (ANAC, 2011).

Tabela 2.7: Aeroportos com maior movimentação de carga transportada em voos domésticos no Brasil em 2010.

Aeroporto	Carga (toneladas)
SBGR em Guarulhos - SP	200.148
SBEG em Manaus - AM	133.700
SBBR em Brasília - DF	80.726
SBFZ em Fortaleza - CE	56.756
SBSP em São Paulo - SP	53.371
SBRF em Recife - PE	46.394
SBSV em Salvador - BA	41.486
SBRJ no Rio de Janeiro - RJ	39.487
SBBE em Belém - PA	28.460
SBPA em Porto Alegre - PR	22.555

Fonte: ANAC (ANAC, 2011).

## 3

### Problemas de localização

Neste capítulo, faz-se uma introdução ao problema geral de localização. Primeiramente, são apresentados alguns fatos históricos e, em seguida, são abordados aspectos sobre os modelos já desenvolvidos para o problema, assim como são destacadas algumas aplicações do problema, corroborando para a importância de seu estudo. Por ser o modelo básico do problema de localização, o modelo da  $p$ -mediana é apresentado. Em seguida, o problema de localização de *hubs* e suas características principais e aplicações são abordados. O problema fundamental de localização de *hubs* é definido e seu modelo  $q$ -hub mediana é apresentado. O Capítulo termina com uma descrição breve sobre os métodos de solução desenvolvidos para resolver o problema de localização de *hubs*.

#### 3.1

##### Introdução

Alguns especialistas acreditam que o problema de localização de facilidades tem sua origem no século XVII, por Battista Cavallieri (1526-1597), Pierre de Fermat (1601-1665) e Evangelista Torricelli (1608-1647). Independentemente, eles propuseram, o problema básico da mediana espacial euclidiana, que trata basicamente de: dado um triângulo (três pontos no plano), encontrar um ponto mediano dentro do triângulo tal que a soma das distâncias entre cada ponto do triângulo e o ponto mediano seja minimizada (Reese, 2006; Drezner e Hamacher, 2004, Cap.1).

Dois séculos mais tarde, Weber (Weber, 1929) apresentou um problema similar, que considerava a existência de um mercado consumidor e de duas regiões fornecedoras de matéria-prima, localizados em três pontos distintos no plano. O objetivo do problema era determinar a localização da fábrica ou o equilíbrio das forças de atração, em que forças de atração eram representadas por custos de transporte. A Figura 3.1 apresenta o triângulo locacional de Weber, como ficou conhecido, em que a fábrica se localiza no ponto mediano o qual minimiza o custo total do transporte.

Este problema foi o marco inicial na história do estudo de localização, sendo usualmente conhecido como o primeiro problema de localização-alocação

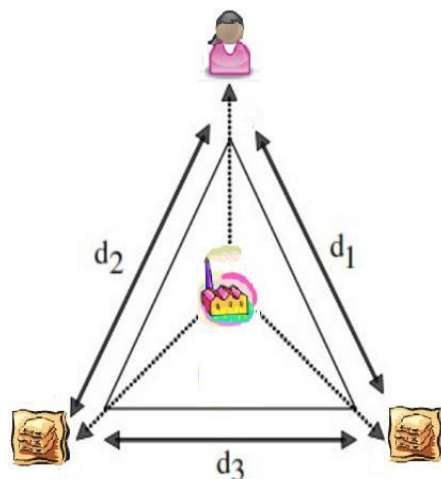


Figura 3.1: Triângulo locacional de Weber (Weber, 1929).

(Farahani et al., 2010). Mais tarde, este problema foi generalizado a fim de encontrar uma mediana em  $n \geq 3$  pontos dados no plano e múltiplas medianas (ou facilidades)  $p \geq 1$  entre pontos dados no plano (Reese, 2006).

Problemas de localização em geral envolvem informação espacial (geográfica) sobre um conjunto de clientes distribuídos entre pontos com potencial para localizar instalações para satisfazer a demanda dos clientes (Drezner e Hamacher, 2004; Nickel e Puerto, 2005, ). Esses problemas respondem em geral às seguintes perguntas: (i) quais facilidades devem ser usadas e/ou abertas? (ii) quais clientes devem ser atendidos e por quais facilidades a fim de minimizar o custo total? Adicionalmente a esta característica genérica, um número de restrições são introduzidas para cada aplicação específica (Melo et al., 2009).

Segundo ReVelle e Iselt (ReVelle e Eiselt, 2005), há quatro componentes que caracterizam os problemas de localização, são eles: (i) clientes, os quais estão localizados em pontos ou rotas; (ii) instalações, que serão localizadas; (iii) lugares, onde clientes e instalações estejam localizados e (iv) uma métrica, que traduza o valor do objetivo entre clientes e instalações.

De fato, os problemas de localização de facilidades pertencem a uma área da Pesquisa Operacional e incluem uma vasta coleção de modelos matemáticos. De forma geral, problemas de localização tratam de decisões sobre onde instalar facilidades, de modo que clientes sejam atendidos via a otimização de algum critério (Drezner, 1995), tal como, por exemplo, custo, lucro, receita, distância, serviço, tempo de espera, cobertura, partes de mercado, etc. (Farahani et al., 2010). O objetivo em geral é do tipo *minisum* ou *minimax*. Modelos *minisum* são projetados para minimizar distâncias médias, enquanto que modelos *minimax* buscam minimizar distâncias máximas. Predominantemente, modelos *minisum* abrangem problemas de localização de empresas privadas,

enquanto que modelos *minimax* concentram problemas de localização que surgem no setor público (Klose e Drexl, 2005).

Segundo Klose e Drexl (Klose e Drexl, 2005), problemas de localização podem ocorrer em ambientes de referência em função do espaço, e assim a forma ou topografia das instalações potenciais produzem diferentes modelos, onde a distância é computada usando uma métrica, como Manhattan ou ângulo reto, euclidiana ou linear, entre outras (ReVelle e Eiselt, 2005). Destacam-se os seguintes modelos básicos.

**Modelos de localização contínua.** Caracterizam-se essencialmente pelo espaço de solução contínuo, isto é, é possível localizar facilidades em todos os pontos no plano.

**Modelos de localização discreta.** São considerados no problema um conjunto discreto de demandas e um conjunto discreto de facilidades candidatas.

**Modelos em redes.** Problemas de localização são modelados por redes compostas por arcos e nós, em que cada nó é um potencial candidato a ser um *hub* (ReVelle et al., 2008).

**Modelos de programação inteira mista.** Controlam decisões sobre localização de facilidades com uso de variáveis binárias e decisões sobre atendimento da demanda com uso de variáveis contínuas.

Ainda, segundo Klose e Drexl (Klose e Drexl, 2005), os modelos matemáticos correspondentes aos problemas de localização de facilidades podem ser classificados como segue:

- Modelos com ou sem restrições de capacidade de satisfação de demanda.
- Modelos de fase única se focam em sistemas de distribuição que abrangem apenas uma fase explicitamente, enquanto que em modelos de fases múltiplas o fluxo de mercadorias em várias fases hierárquicas deve ser examinado.
- Modelos de produto simples permitem que demanda, custo e capacidade com relação a vários produtos sejam agregados em um único produto simples e homogêneo.
- Em geral, modelos de localização se baseiam no pressuposto que a demanda é não-elástica, ou seja, a demanda é independente das decisões espaciais.



- Modelos estáticos tentam otimizar o desempenho do sistema para um período representativo. Por outro lado, modelos dinâmicos refletem dados de custo, demanda, capacidade, etc., que variam ao longo de um horizonte de planejamento.
- Na prática, dados de um problema de localização são baseados em previsões, e, portanto, são suscetíveis a erros associados aos métodos de previsão. Como consequência, tem-se modelos determinísticos com dados fixos e conhecidos e modelos probabilísticos com dados estocásticos.
- Em modelos clássicos, avalia-se a qualidade de satisfação da demanda sem considerar o roteamento das entregas.

Aplicações de problemas de localização vão desde postos de gasolina e lojas de *fast food* até aterros sanitários e usinas elétricas (ReVelle e Eiselt, 2005). Do ponto de vista da aplicação, não há limitação para os usuários do problema de localização, que podem ser entidades governamentais ou privadas (Farahani et al., 2010). Devido ao seu potencial prático, o problema de localização vem despertando interesse amplo em diferentes áreas e tem gerado uma vastidão de artigos e pesquisas. Dentre os artigos do tipo revisão da literatura estão:

Brandeau e Chiu (Brandeau e Chiu, 1989) apresentaram uma visão geral de problemas de localização para modelos de tipo planar, discreto, contínuo, misto e redes, assim como aplicações no setor público e privado e seus métodos de solução, incluindo métodos exatos e heurísticas.

Owen e Daskin (Owen e Daskin, 1998) apresentaram uma revisão de literatura sobre localização de facilidades dedicados a captar o tempo de complexidade e características de incerteza de problemas com instâncias do mundo real, mostraram também como os avanços na programação inteira, programação dinâmica, programação estocástica e técnicas de planejamento de cenários acrescentaram a possibilidade de análise, modelagem e solução de importantes problemas de localização de instalações estratégicas.

ReVelle e Eiselt (ReVelle e Eiselt, 2005) apresentaram o espaço de solução para decisões de localização, modelos de localização no plano e em redes, incluindo suas extensões e a importância do objetivo na tomada de decisões de problemas de localização.

Klose e Drexel (Klose e Drexel, 2005) fazem uma classificação dos diferentes modelos de localização e os apresentam segundo o espaço de solução contínuo, redes ou inteira mista, exemplificando aplicações de problemas de localização.

Snyder (Snyder, 2006) apresenta uma revisão da literatura sobre modelos de localização de facilidades estocásticos e robustos, a fim de ilustrar a



variedade de abordagens para otimização sob incerteza que têm aparecido na literatura, e suas aplicações a problemas de localização de facilidades.

Şahin e Süral (Şahin e Süral, 2007) apresentaram uma visão global de modelos de localização de facilidades hierárquicas, aplicações e métodos de solução de modelos de forma simples, a fim de unificar as definições existentes e poder classificar os modelos, fornecendo uma lista de referência abrangente.

Farahani *et al.* (Farahani et al., 2010) apresentam uma revisão da literatura sobre problemas de localização multicritério em três categorias, incluindo problemas biobjetivo, multiobjetivo e multiatributo e seus métodos de solução, e os diferentes critérios utilizados.

Melo *et al.* (Melo et al., 2009) apresentaram uma revisão da literatura relacionada à localização de instalações na cadeia de suprimentos. Mostraram que, além de fatores econômicos, nesse contexto é interessante considerar outros objetivos referentes à logística direta e reversa.

ReVelle *et al.* (ReVelle et al., 2008) apresentam uma visão geral de modelos contínuos e algoritmos de solução para problemas de localização.

Dentre os livros sobre problemas de localização de facilidades destacam-se os de Daskin (Daskin, 1995), Drezner (Drezner, 1995), Drezner e Hamacher (Drezner e Hamacher, 2004), Farahani e Hekmatfar (Farahani e Hekmatfar, 2009) e Nickel e Puerto (Nickel e Puerto, 2005).

### 3.2

#### Problemas de localização baseados no modelo da $p$ -mediana

Problemas de localização baseados no modelo da  $p$ -mediana apresentam aplicações nas áreas de saúde, educação, transporte aéreo, indústria, distribuição, etc. Em Pizzolato *et al.* (Pizzolato et al., 2012), uma revisão sobre as aplicações dos problemas de localização que utilizam o modelo da  $p$ -mediana, variantes desse modelo e métodos de solução é apresentada; em Reese (Reese, 2006) são apresentados métodos de solução e uma diversificada gama de aplicações suplementares desse modelo, citando apenas dois trabalhos.

Alzamora *et al.* (Alzamora et al., 2011) propõem a localização de diferentes categorias de estabelecimentos de saúde no distrito de Ácora, em Puno, Peru, assim como uma projeção para o ano 2016. O modelo da  $p$ -mediana é integrado à técnica de diagrama de Voronoi para ilustrar as áreas de abrangência dos estabelecimentos. Estudos de localização de facilidades no setor de saúde podem ser encontrados ainda nos trabalhos de Rais e Viana (Rais e Viana, 2010) que apresentam o papel da saúde na Pesquisa Operacional.

Menezes (Menezes, 2011) propõe a localização de novas escolas públicas na região de Guaratiba, Rio de Janeiro, considerando a expectativa de cresci-

mento da população para os anos 2015 e 2020.

Pizzolato *et al.* (Pizzolato et al., 2004) propõem localizações ideais de escolas no município de Nilópolis usando o algoritmo de *Floyd-Warshall* para completar a matriz de distâncias para todos os pares de pontos.

Martins e Pizzolato (Martins e Pizzolato, 2004) propõem a localização de bases de helicópteros no combate de ações criminosas. Considera-se que os helicópteros são importantes para orientar a chegada de equipes terrestres.

Lobo (Lobo, 2003) desenvolve uma metodologia baseada no modelo da  $p$ -mediana para dimensionar e localizar unidades de educação infantil na cidade de Cascavel-PR. As áreas de abrangência de cada escola são determinadas mediante o uso do diagrama de Voronoi.

### 3.2.1

#### O modelo da $p$ -mediana

O modelo matemático mais popular associado ao problema de localização é o modelo da  $p$ -mediana e suas primeiras formulações foram apresentadas por Hakimi (Hakimi, 1964) e Kariv e Hakimi (Kariv e Hakimi, 1979). Na versão simplificada do modelo, fixa-se o número de instalações  $p$  a serem localizadas no conjunto de pontos dados, de modo a minimizar a soma ponderada das distâncias dos clientes, centrados em pontos do conjunto, às instalações disponíveis.

Sejam os parâmetros  $N$  o conjunto de  $n$  pontos ou nós dados, com  $i, j \in N$ ;  $p$  ( $< n$ ) o número de medianas a serem localizadas;  $w_i$  o peso associado a cada ponto  $i$ ; e  $[d_{ij}]_{n \times n}$  a matriz simétrica das distâncias, em que cada elemento  $d_{ij}$  é a distância do ponto  $i$  ao ponto  $j$ , com  $d_{ii} = 0$ ,  $\forall i$ . Considere ainda a ser determinada a matriz de alocações  $[z_{ij}]_{n \times n}$ , onde  $z_{ij} = 1$ , se o ponto  $i$  é alocado a  $j$ , e  $z_{ij} = 0$ , caso contrário;  $z_{jj} = 1$  indica que  $j$  é uma mediana e  $z_{jj} = 0$  indica o caso contrário. Então, o modelo da  $p$ -mediana pode ser formulado como segue:

$$\text{minimizar } \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} w_i d_{ij} z_{ij} \quad (3-1)$$

$$\text{sujeito a } \sum_{j \in N} z_{ij} = 1 \quad i \in N \quad (3-2)$$

$$\sum_{j \in N} z_{jj} = p \quad (3-3)$$

$$z_{ij} - z_{jj} \leq 0 \quad i, j \in N \quad (3-4)$$

$$z_{ij} \in \{0, 1\} \quad i, j \in N, \quad (3-5)$$

onde o objetivo (3-1) é minimizar a soma ponderada das distâncias entre os pontos dados e os pontos selecionados como medianas; as restrições em (3-2) indicam que cada ponto  $i$  é conectado somente a uma única mediana  $j$ ; a restrição (3-3) garante que há exatamente  $p$  medianas; as restrições em (3-4) afirmam que cada ponto deve ser atribuído a uma mediana, e, finalmente, variáveis de decisão binárias são impostas em (3-5).

Observa-se que, em lugar de localização, o modelo acima pode ser interpretado como modelo de zoneamento, em que se busca dividir o espaço em  $p$  zonas de acordo com o peso atribuído a cada zona.

### 3.3

#### Problemas de localização de hubs

Problemas de desenho de *hub-and-spoke* são conhecidos geralmente por problemas de localização de *hubs*, e tratam da localização de *hubs* e da alocação de nós não-*hubs* (i.e. *spokes*), de modo a satisfazer a demanda e otimizar um ou mais critérios, (An et al., 2011).

Estes problemas de localização são estudados por pesquisadores de diversas áreas, tais como, por exemplo, transportes (de passageiros e de carga), telecomunicações, desenho de redes, geografia, ciência da computação, economia, e são parte da pesquisa operacional.

Segundo Campbell e O’Kelly (Campbell e O’Kelly, 2012), problemas de localização de *hubs* envolvem a localização de nós em uma rede através dos quais fluxos são encaminhados a partir de nós origem a nós destino. Os caminhos na rede que começam em nós origem e terminam em nós destino podem estar conectados de forma direta ou através de caminhos que passam por *hubs*.

A Figura 3.2 mostra três possíveis caminhos a partir do *spoke* origem  $i$  ao *spoke* destino  $j$ , observa-se que o primeiro caminho é direto, sem intervenção de *hubs*; o segundo caminho passa pelo *hub*  $h$ , ou seja, o caminho é composto da conexão do *spoke*  $i$  ao *hub*  $h$  e da conexão do *hub*  $h$  ao *spoke*  $j$ ; e o terceiro caminho passa pelos *hubs*  $h_1$  e  $h_2$ , isto é, existe uma conexão do *spoke*  $i$  ao *hub*  $h_1$ , uma conexão inter-*hubs* entre  $h_1$  e  $h_2$ , e uma conexão do *hub*  $h_2$  ao *spoke*  $j$  (Campbell e O’Kelly, 2012).

As instalações *hubs* possuem duas principais funções: (i) de troca, classificação ou conexão, permitindo que os fluxos sejam redirecionados, e (ii) de consolidação ou carga fracionada, permitindo que os fluxos sejam agregados ou desagregados.

De fato, *hubs* são introduzidos para decrementar o número de conexões entre nós origem e destino (Farahani et al., 2013), quando comparados a uma

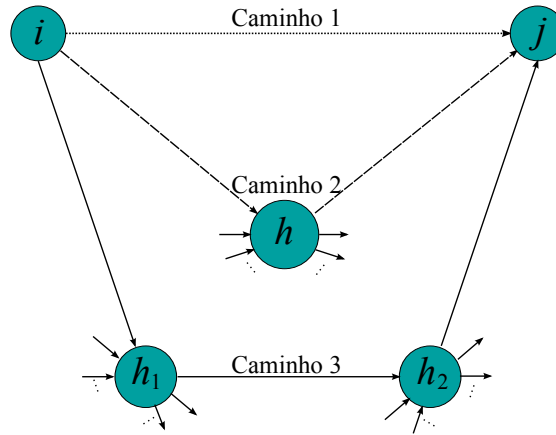


Figura 3.2: Caminhos alternativos entre a origem  $i$  e o destino  $j$ .

rede sem *hubs*. A introdução de *hubs* em uma rede permite consolidar fluxos, gerando um número menor de conexões, e consequentemente reduzir o custo operativo significativamente com economia de escala (An et al., 2011). Por exemplo, uma rede com  $N$  nós completa e sem *hubs* tem  $N(N - 1)$  conexões origem-destino, mas se um *hub* for introduzido na rede para se conectar a todos os nós, existirão somente  $2(N - 1)$  conexões entre todos os pares origem-destino. A Figura 3.3 mostra uma rede completa à esquerda, com um total de 20 conexões diretas entre origem e destino, sem passagens intermediárias. À direita, é apresentada uma rede *hub* com um total de 8 conexões origem e destino que passam pelo *hub* A. Esta ideia pode ser generalizada para redes com mais de um *hub*.

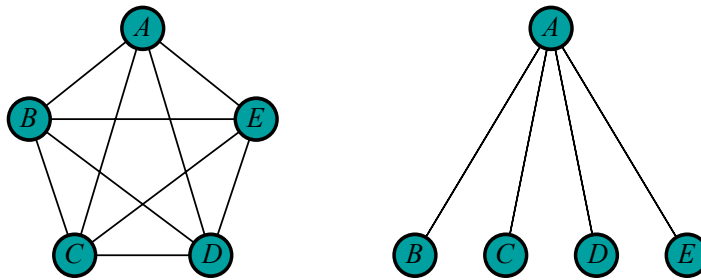


Figura 3.3: Rede totalmente conectada vs rede com um *hub*.

Geralmente, numa rede *hub* devem ser considerados sete tipos de fluxos distintos, tal como na Figura 3.4, em que *spokes* são representados por círculos e *hubs* por quadrados. Em (a) o fluxo *spoke-hub* representa uma conexão com uma passagem, já em (b) uma conexão com uma passagem é dada pelo fluxo *hub-spoke*. Em (c) o fluxo *spoke-hub-spoke* também representa uma conexão com uma passagem. Para representar uma conexão com duas passagens, tem-se o fluxo *spoke-hub-hub* em (d) e o fluxo é *hub-hub-spoke* em (e). O fluxo *hub-hub* em (f) representa uma conexão com duas passagens, assim como o

fluxo *spoke-hub-hub-spoke* em (g).

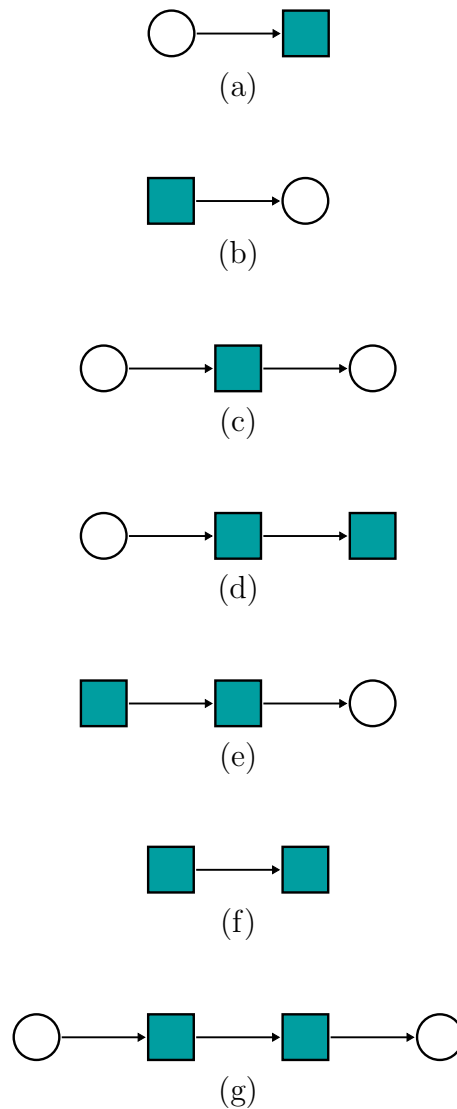


Figura 3.4: Tipos de fluxo numa rede *hub-and-spoke*.

Uma visão geral da pesquisa sendo desenvolvida sobre problemas de localização de *hubs* pode ser encontrada em Drezner (Drezner, 1995), Drezner e Hamacher (Drezner e Hamacher, 2004) e Campbell e O’Kelly (Campbell e O’Kelly, 2012). Neste último, se faz um *overview* dos 25 anos de pesquisa de localização de *hubs* e fornece reflexões sobre suas origens, comentários sobre o presente, e sugere direções promissoras para os próximos 25 anos. Outros trabalhos de revisão da literatura interessantes são Klincewicz (Klincewicz, 1998), Alumur e Kara (Alumur e Kara, 2008), que categorizaram os problemas de localização de *hubs* em quatro grandes subgrupos: problema *p-hub* mediana, problema de localização de *hubs* com custos fixos, problema *p-hub* centro e problema de *hubs* de cobertura, Hekmatfar e Pishvaei (Hekmatfar e Pishvaei,

2009) e Campbell *et al.* (Campbell et al., 2009), nos quais pode-se verificar que muitos modelos sofisticados têm sido propostos. Farahani *et al.* (Farahani et al., 2013) apresentam uma revisão e classificação de modelos, técnicas de solução, assim como aplicações de problemas de localização de *hubs* e futuras tendências.

Dentre as aplicações de problemas de localização de *hubs* podem ser mencionados os seguintes trabalhos:

Figueiredo *et al.* (Figueiredo et al., 2012) propõem o critério *mini-hubs* e *major-hubs* no sistema aéreo brasileiro e um método heurístico de solução de duas fases, em que são resolvidos os modelos da *p*-mediana na primeira fase e o modelo *p-hub* mediana de alocação múltipla na segunda fase.

Adler e Hashai (Adler e Hashai, 2005) pesquisam sobre políticas a céu aberto no transporte aéreo do Oriente Médio; são escolhidos quatro *hubs*: os aeroportos Cairo, Tehran, Istanbul e Riyadh. Assim, foi determinado que o aeroporto de Dubai, que é hoje um importante centro de transporte aéreo, não é um *hub* ótimo. Conclui-se que decisões políticas e econômicas se sobrepõem à localização ótima.

Aversa *et al.* (Aversa et al., 2005) propõem um modelo de planejamento misto para escolher um porto-*hub* entre onze portos de serviço de transporte na costa leste sul americana. Santos, no Brasil, foi escolhido como porto-*hub*.

Eiselt (Eiselt, 2007) apresenta um modelo de localização de aterro sanitário como um problema de localização de *hubs*. Inclui o fator de desconto de transporte entre estações de transferência e o aterro sanitário em comparação ao custo de unidade de transporte entre clientes e estações de transferência.

Cunha e Silva (Cunha e Silva, 2007) apresentam o problema de redes *hub-and-spoke* para empresas de transporte de caminhão que operam no Brasil. O problema consiste em determinar o número de terminais (*hubs*), localizar e atribuir os *spokes* aos *hubs*, visando minimizar o custo total, o qual é composto por custos fixos e variáveis.

Kara e Tansel (Kara e Tansel, 2001) utilizaram o problema de localização de *hubs*, considerando o critério min-max para alocação simples e minimizando o tempo máximo de entrega de um produto.

No trabalho seminal de O'Kelly (O'Kelly, 1987) uma formulação matemática para o problema de localização de *hubs* é proposta pela primeira vez. Ele estudou um problema de fluxo de passageiros de companhias aéreas americanas em 25 cidades americanas, com dados correspondentes ao ano 1970.

Segundo Campbell e O'Kelly (Campbell e O'Kelly, 2012), as principais características dos problemas de localização de *hubs* são:

1. Demandas estão associadas a fluxos entre pares origem-destino, e não de forma pontual.
2. Os fluxos são autorizados a passar por instalações de *hubs*.
3. *Hubs* são instalações a serem localizadas na rede.
4. Existe um benefício no roteamento de fluxos através de *hubs*.
5. O objetivo depende da localização de *hubs* e do roteamento de fluxos.
6. Caminhos entre pares origem-destino passam por um ou dois *hubs*.
7. Fluxos diretos origem-destino não são permitidos.

Campbell (Campbell, 1994) adicionou estas duas últimas características, definindo o “problema fundamental de localização de *hubs*”, o qual é estudado nesta pesquisa.

Farahani *et al.* (Farahani et al., 2013) apresentam algumas definições e classificações para que modelos matemáticos para desenho de redes com *hubs* sejam formulados, as quais são destacadas a seguir.

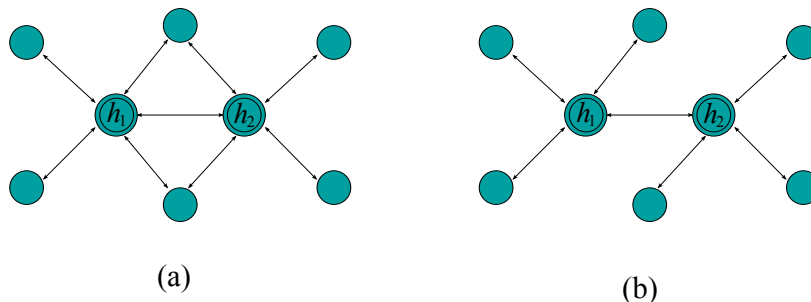


Figura 3.5: Redes de alocação múltipla (a) e alocação simples (b).

**Domínio de solução:** rede (todos os nós da rede são candidatos a serem *hubs*), discreto (um subconjunto de nós da rede são candidatos a *hubs*) e contínuo (pontos do plano ou de uma esfera são candidatos a *hubs*).

**Critério:** *minimax* (o custo máximo de transporte entre nós origem-destino é minimizado), *minisum* (o custo total incorrido pela localização de *hubs* e alocação de nós a *hubs* é minimizada).

**Determinação do número de *hubs* a localizar:** exógeno (o número de *hubs* a serem localizados é especificado *a priori*) ou endógeno (o número de *hubs* a serem localizados é determinado como parte da solução).

**Número de *hubs*:** simples ou múltiplos.

**Capacidade nos *hubs*:** considera-se ou não capacidade máxima de fluxo passando por eles.

**Custo de localização de *hubs*:** sem custo, custo fixo e custo variável.

**Alocação de um nó a um nó *hub*:** a um *hub* (alocação simples) e a mais de um *hub* (alocação múltipla). A Figura 3.3 mostra esses casos, onde (a) indica que um *spoke* pode estar alocado a mais de um *hub*, e (b) indica que um *spoke* pode estar alocado somente a um *hub*.

**Custo de conexão de um nó a um nó *hub*:** sem custo, custo fixo ou custo variável.

### 3.3.1

#### Problema seminal de localização de hubs

O estudo formal do problema de localização de *hubs* foi introduzido por O’Kelly (O’Kelly, 1987), no qual foram propostos um modelo de programação quadrática e dois métodos heurísticos baseados em enumeração.

Sejam os parâmetros  $N$  o conjunto de  $n$  nós ou vértices dados, com  $i, j, k, m \in N$ ;  $w_{ij}$  o fluxo entre os nós  $i$  e  $j$ ;  $d_{ij}$  a distância entre os nós  $i$  e  $j$ ;  $\alpha$  o fator de desconto para o fluxo entre *hubs*; e  $q$  o número de *hubs*. Considere ainda a variável de decisão  $x_{ik} = 1$ , se o nó  $i$  é alocado ao hub  $k$ , e  $x_{ik} = 0$ , caso contrário;  $x_{kk} = 1$  indica se  $k$  é um *hub* e  $x_{kk} = 0$ , caso contrário. O modelo seminal do problema proposto por O’Kelly de alocação simples é formulado como:

$$\text{minimizar } \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} w_{ij} \left( \sum_{k \in N} d_{ik} x_{ik} + \sum_{m \in N} d_{jm} x_{jm} + \alpha \sum_{k \in N} \sum_{m \in N} d_{km} x_{ik} x_{jm} \right) \quad (3-6)$$

$$\text{sujeito a } (n - q + 1)x_{kk} - \sum_{i \in N} x_{ik} \geq 0, \quad k \in N \quad (3-7)$$

$$\sum_{k \in N} x_{ik} = 1 \quad i \in N \quad (3-8)$$

$$\sum_{k \in N} x_{kk} = q \quad (3-9)$$

$$x_{ik} \in \{0, 1\}. \quad i \in N, k \in N \quad (3-10)$$

O objetivo do problema é minimizar o custo total de transporte aéreo (3-6). Os primeiros dois termos de (3-6) representam os custos de entrada e saída de fluxos no *hub*, enquanto o terceiro termo contabiliza os custos associados aos fluxos inter-*hubs*; o parâmetro  $\alpha$  reflete o efeito escala de interconexão de fluxos, pois a ideia é que quanto maior for o fluxo inter-*hubs*, maior será o



desconto na taxa de transporte. O grupo de restrições em (3-7) assegura que nenhum vértice seja atribuído a uma localidade, a menos que um *hub* seja aberto naquele local (i.e., deve-se ter  $x_{ik} = 1$ , para que algum vértice seja alocado em  $k$ ), fixa-se um limite máximo de  $(n - q + 1)$  vértices associado a um *hub*, incluindo ele próprio. As restrições em (3-8) garantem que cada vértice seja atribuído somente a um *hub*, a restrição (3-9) fixa o número de *hubs* e em (3-10) as variáveis de decisão de tipo binário são definidas.

A restrição (3-7), que assegura que um nó somente é alocado a um nó se este for *hub*, pode ser substituída por:

$$x_{ij} \leq x_{jj} \quad i, j \in N. \quad (3-11)$$

### 3.3.2

#### O modelo $q$ -hub-mediana

Usando como justificativa que o modelo de relaxação linear proposto por Campbell (Campbell, 1994) resultava em soluções muito fracionadas para o problema fundamental de localização de *hubs*, Skorin-Kapov *et al.* (Skorin-Kapov et al., 1996) propuseram um modelo de programação inteira mista para resolver o problema fundamental de localização de *hubs* baseado no modelo da  $p$ -mediana, conhecido como modelo  $q$ -hub-mediana. Vale lembrar que no problema fundamental de localização de *hubs*, fluxos entre pares origem-destino passam por um ou dois *hubs*, não permitindo fluxos diretos.

Sejam os parâmetros  $P$  o conjunto de nós ou vértices, com  $i, j, k, m \in P$ ;  $w_{ij}$  o fluxo entre os nós  $i$  e  $j$ ;  $[d_{ij}]_{P \times P}$  a matriz simétrica das distâncias, em que cada elemento  $d_{ij}$  é a distância entre os nós  $i$  e  $j$ ;  $\alpha$  o fator de desconto para o fluxo entre *hubs*; e  $q$  o número de *hubs* a serem localizados. Considere as variáveis de decisão  $y_{ijkm}$  como sendo o fluxo de  $i$  a  $j$  que passa pelos *hubs*  $k$  e  $m$  nesta ordem, se  $k = m$ , então o fluxo passa por um único *hub*; e  $x_{ik} = 1$  como sendo o nó *spoke*  $i$  alocado ao *hub*  $k$ , e  $x_{ik} = 0$ , no caso contrário; ainda  $x_{kk} = 1$  indica que  $k$  é um *hub*, e  $x_{kk} = 0$  o caso contrário. Então, o modelo de  $q$ -hub mediana é formulado por:

$$\text{minimizar} \quad \sum_{i \in P} \sum_{j \in P} \sum_{k \in P} \sum_{m \in P} w_{ij} (d_{ik} + d_{jm} + \alpha d_{km}) y_{ijkm} \quad (3-12)$$

$$\text{sujeito a} \quad \sum_{k \in P} x_{kk} = q \quad (3-13)$$

$$\sum_{k \in P} x_{ik} = 1 \quad i \in P \quad (3-14)$$

$$\sum_{m \in P} y_{ijkm} = x_{ik} \quad i, j, k \in P \quad (3-15)$$

$$\sum_{k \in P} y_{ijkm} = x_{jm} \quad i, j, m \in P \quad (3-16)$$

$$x_{ij} \leq x_{jj} \quad i, j \in P \quad (3-17)$$

$$y_{ijkm} \geq 0 \quad i, j, k, m \in P \quad (3-18)$$

$$x_{ik} \in \{0, 1\}, \quad i, k \in P \quad (3-19)$$

onde a função objetivo (3-12) a ser minimizada representa os custos envolvidos no transporte entre cada par origem-destino. Por (3-13) um número fixo de *hubs* deve ser localizado. Em (3-14) as restrições asseguram que cada nó é alocado a exatamente um único *hub*. As restrições (3-15) asseguram que  $x_{ik}$  é factível se a instalação  $i$  é alocada ao *hub*  $k$  independente do destino, enquanto que as restrições em (3-16) asseguram que o caminho é factível somente se  $j$  é alocado no *hub*  $m$  independentemente da origem. Em (3-17) as restrições garantem que um nó somente é atribuído a um *hub* já localizado. As restrições em (3-18) indicam que as decisões de fluxo são não negativas, enquanto que as restrições em (3-19) as definem variáveis de decisão de tipo binário.

### 3.4

#### Métodos de solução

Métodos de solução para o problema de localização de *hubs* já foram propostos em diversos trabalhos da literatura acadêmica. Nesta seção, será apresentada uma breve descrição sobre os métodos já desenvolvidos. Porém, não será aqui abordado os métodos baseados em modelos contínuos, tais como, por exemplo, em Farahani *et al.* (Farahani et al., 2013) e Alzamora *et al.* (Alzamora et al., 2012).

#### 3.4.1

##### Métodos Exatos

Métodos exatos encontram uma solução garantidamente ótima. Portanto, o tempo de execução de um algoritmo exato é em geral bem maior que o tempo de execução de um método heurístico ou metaheurística quando se resolve problemas considerados difíceis e de tamanho grande.

Segundo Pizzolato *et al.* (Pizzolato et al., 2012), a opção por aplicar um método exato depende de vários fatores, tais como a importância de se obter uma solução ótima, a disponibilidade de recursos computacionais e o tamanho do problema. Sabe-se que a variedade de problemas associados à localização apresenta, em geral, pequenas alterações na estrutura de seus modelos.

Métodos de solução exatos para problemas de localização de *hubs* são relatados nos trabalhos de revisão de Alumur e Kara (Alumur e Kara, 2008),

Hekmatfar e Pishvaei (Hekmatfar e Pishvaei, 2009) e no de Farahani *et al.* (Farahani et al., 2013). A Tabela 3.1 define a notação para introduzir vários tipos de problemas de localização de *hubs*. Já na Figura 3.6 é possível observar a tabela preparada por Farahani *et al.* (Farahani et al., 2013) com os trabalhos realizados, relacionando o tipo de problema de localização de *hubs* e o método abordado. Em particular, a primeira coluna da tabela informa a classificação do tipo de problema estudado; a segunda coluna informa o nome do autor ou autores; a terceira coluna informa o método de solução proposto e a quarta coluna informa a eficiência do método segundo o número de nós avaliado, e a quinta coluna se refere ao número de *hubs* avaliado.

Tabela 3.1: Notação para diferentes tipos de Problemas de localização de *hubs*.

Capacidade do nó <i>hub</i>	Capacitado (C) não capacitado (U)
Atribuição do nó <i>spoke</i> a <i>hub</i>	Alocação Simples (SA) Alocação Múltipla (MA)
Tipo de problema de localização de <i>hubs</i>	Mediana (M) Centro (T) Cobertura (V) Conjunto Cobertura (SV) Cobertura Máxima (MV)
Número de nós <i>hub</i>	Simples (1) Mais de um (P)

Fonte: Farahani *et al.* (Farahani et al., 2013).

Uma técnica importante por detrás dos algoritmos desenvolvidos que resolvem problemas de programação inteira é a de relaxação linear. Nem sempre essa técnica é explícita, porém no trabalho Wagner (Wagner, 2008) essa técnica foi o bastante para resolver um problema de localização de *hubs* de alocação simples não capacitado, que usa o modelo de *p-hub* mediana.

A seguir descreve-se em linhas gerais os principais métodos exatos.

### Método lagrangeano

Usado para resolver problemas complexos com um grande número de restrições, este método está fundamentado em resolver uma sequência de subproblemas derivados de relaxações lagrangeanas do problema de programação linear inteiro. Identificadas as restrições difíceis do problema, elas são incorporadas à função objetivo juntamente com seus multiplicadores de Lagrange, resultando em um subproblema cuja solução fornece um limitante para o valor da função objetivo do problema original. Porém, o subproblema resultante agora

apresenta, além das variáveis do problema, novas variáveis que são os multiplicadores de Lagrange. Para contornar tal dificuldade, resolve-se o problema dual associado relativamente mais simples, que é um problema de otimização cuja função objetivo é linear por partes, exigindo um método de solução capaz de lidar com a não diferenciabilidade da função, além de outras dificuldades inerentes.

Aykin (Aykin, 1994) apresenta procedimentos baseados em relaxação lagrangeana e resolve problemas de localização de *hubs* capacitados usando este método.

### Branch-and-bound

*Branch-and-bound* é o método exato mais usado para resolver problemas lineares inteiros (Wolsey, 1998). A ideia geral do método é gerar subproblemas derivados de relaxações lineares e da incorporação de restrições com variáveis com valor fracionário dos subproblemas antecessores. Sua metodologia básica é a de enumeração implícita, onde sucessivos limites para os valores da função objetivo do problema original são usados de modo a reduzir o número de enumerações, e, assim, garantir a obtenção de uma solução ótima em tempo razoável.

### Branch-and-cut

É uma derivação do método *branch-and-bound*. Dado um problema de programação inteira, resolve-se relaxações lineares correspondentes a formulações do problema original com um número grande de restrições. Tais formulações são de grande interesse devido ao fato de serem as únicas possíveis para determinados problemas ou, em outros casos, fornecerem melhores estimativas para o valor da solução ótima do problema do que formulações com um número polinomial de restrições.

Labbe *et al.* (Labbe et al., 2005) apresentam um método de solução baseado no algoritmo *branch-and-cut* para resolver um problema de localização de *hubs* sem capacidade com alocação simples. Rodríguez-Martín e Salazar-González (Rodríguez-Martín e Salazar-González, 2008) apresentam uma formulação de programação linear inteira mista e descrevem dois algoritmos *branch-and-cut* baseados em técnicas de decomposição para resolver problemas de localização de *hubs* capacitados de alocação múltipla.

### Decomposição de Benders

Decomposição de Benders é um método de particionamento para resolver problemas de programação linear inteira mista (Benders, 1962). Ele decompõe

o problema original em dois subproblemas, em que um deles é chamado de problema mestre.

Segundo Camargo *et al.* (de Camargo et al., 2008), o problema mestre é uma versão simplificada do problema original, possuindo um subconjunto de variáveis e restrições correspondentes, enquanto que o outro subproblema é o problema original com os valores fixados das variáveis tratadas pelo problema mestre. Assim, resolve-se cada subproblema, mais simples que o original, de forma iterativa, partindo da resolução do problema mestre. A cada ciclo, uma nova restrição, conhecida como corte de Benders, é adicionada ao problema mestre. O ciclo é repetido até que os valores das funções objetivo do problema mestre e do subproblema sejam aproximadamente iguais.

Camargo *et al.* (de Camargo et al., 2008) e Contreras *et al.* (Contreras et al., 2011) apresentam um método de solução baseado no algoritmo de decomposição de Benders para localização de *hubs* não capacitado com alocação múltipla.

### 3.4.2

#### Heurísticas e metaheurísticas

Segundo Pizzolato *et al.* (Pizzolato et al., 2012), o uso de heurísticas pode ser desejável quando há existência de restrições não explícitas ou preferências subjetivas não incorporadas ao modelo ou decorrentes do uso de hipóteses simplificadoras. Estas podem ser construídas caso a caso, em função do problema em estudo. No entanto, as metaheurísticas baseiam-se no uso de conhecimentos e relações lógicas do problema específico na busca de uma solução satisfatória. Elas buscam primordialmente explorar soluções candidatas privilegiando recursos informáticos, porque são desenvolvidas para resolver mais de uma classe de problemas.

Na Figura 3.7, Farahani *et al.* (Farahani et al., 2013) apresentam uma tabela que relaciona os trabalhos realizados sobre o problema de localização de *hubs* e os algoritmos heurísticos aplicados. A primeira coluna da tabela informa o tipo do problema estudado, cuja notação foi introduzida na Tabela 3.1, a segunda coluna informa o nome do autor ou autores; a terceira coluna informa o método de solução proposto e a quarta coluna informa a eficiência do método segundo o número de nós avaliado, e a quinta coluna se refere ao número de *hubs* avaliado.

A seguir, os principais métodos heurísticos são abordados em linhas gerais.

## Método guloso

Introduzida por Kuehn e Hamburger (Kuehn e Hamburguer, 1963), a heurística *greedy* para resolver o problema de localização parte de um conjunto vazio de  $N$  instalações abertas, e então o problema 1-mediana é resolvido e a mediana é adicionada a este conjunto. Este processo é repetido até que o número de  $p$  medianas seja alcançado, selecionando a localização que mais reduz o custo total.

Um algoritmo guloso foi proposto por Sasaki *et al.* (Sasaki et al., 1999) para resolver um problema de localização de *hubs* com alocação múltipla, sem capacidade e com uma parada. Uma parada significa que cada caminho origem-destino pode passar por um único *hub*. Sugere-se a aplicação deste método em redes pequenas, como, por exemplo, as redes aéreas japonesas.

## Stingy

Introduzido por Feldman *et al.* (Feldman et al., 1966), também conhecido como *Drop* ou *Greedy-Drop*, este método heurístico começa com todas as  $N$  instalações abertas, em seguida, remove-as, uma a uma, até que o número de instalações seja reduzido a  $p$ , selecionando a localização que menos incrementa o custo total.

## Dual ascent

Esta heurística baseia-se na relaxação da formulação dual do modelo da  $p$ -mediana. Usa a heurística DUALOC (Erlenkotter, 1978).

Heurísticas para resolver problemas de  $p$ -mediana deste tipo são propostos em (Galvão, 1980) e (Captivo, 1991).

## Alternate

Introduzida por Maranzana (Maranzana, 1964), na primeira iteração desse método heurístico, instalações são localizadas em  $p$  pontos selecionados em  $N$ , e então os usuários são atribuídos à instalação mais próxima. O problema 1-mediana é resolvido a cada conjunto de usuários de cada instalação. O processo é iterado com estas novas localizações de instalações até que nenhuma outra alteração nas atribuições ocorra.

## Interchange

Conhecido como método de substituição de vértices de Teitz e Bart (Teitz e Bart, 1968), já foi usado como padrão de comparação com outros métodos de solução. Aqui, um certo padrão de  $p$  instalações é dada inicialmente, em

seguida, as instalações são movidas de forma iterativa, uma a uma, para locais vazios com o objetivo de reduzir o custo total. Este processo de busca local pára quando não há mais redução do valor da função objetivo.

## Two stage

Um método de solução heurístico é proposto por Figueiredo *et al.* (Figueiredo et al., 2012), com o objetivo de resolver o problema de localização de *hubs* com alocação múltipla em duas fases. Na primeira fase, considerando o tráfego esparsa em algumas localidades, é aplicado o modelo da *p*-mediana para identificar 33 pontos regionais centróides, que são usados como clusters para o fluxo de tráfego no Brasil. Estas medianas são incorporadas à rede final na segunda fase do modelo. Nesta fase, considera-se somente o fluxo de interação entre estes 33 pontos para determinar a localização de *hubs* e a alocação aos nós *spokes*. É proposto um modelo baseado no de *q-hub* mediana com alocação múltipla, permitindo fluxos diretos sem passar por *hubs*.

## Algoritmos genéticos

Introduzido por Holland (Holland, 1975), os algoritmos genéticos estabelecem uma analogia entre o conjunto de soluções candidatas de um problema de otimização e o conjunto de indivíduos de uma população que evoluem. Para tal, é introduzida uma função de avaliação de cada solução candidata e mecanismos para gerar novas e promissoras soluções candidatas.

Topcuoglu *et al.* (Topcuoglu et al., 2005) propõem algoritmos genéticos para resolver problemas de localização de *hubs* com custos fixos e alocação simples, Cunha e Silva (Cunha e Silva, 2007) resolvem o problema de localização *hub-and-spoke* para serviços de transporte de caminhões, e Kratica *et al.* (Kratika et al., 2007) propõem dois algoritmos genéticos para resolver problemas de *p-hub* mediana de alocação simples.

## Busca Tabu

A busca tabu teve suas raízes na década 60, mas foi Glover (Glover, 1986) quem propôs a forma como é apresentada hoje. Esta técnica segue os princípios gerais da Inteligência Artificial (IA) e é utilizada para guiar o procedimento de busca local na procura por um ótimo de um problema de otimização. Toma o conceito de memória da IA e a implementa usando estruturas simples a fim de conduzir a busca considerando o histórico da mesma.

Alguns problemas de localização de *hubs* que usam métodos de busca tabu são Skorin-Kapov e Skorin-Kapov (Skorin-Kapov e Skorin-Kapov, 1994),

Marianov e Serra (Marianov e Serra, 2003), Chen (Chen, 2007), Wagner (Wagner, 2007) e Pamuk e Sepil (Pamuk e Sepil, 2001).

### **Simulated Annealing**

Proposto por Kirkpatrick (Kirkpatrick et al., 1983), *Simulated Annealing* (SA) obtém soluções ótimas aproximadas para um problema de otimização, fazendo analogia com o comportamento de um sistema físico, no qual certo material é submetido ao resfriamento. Neste procedimento de busca por um ótimo, todo movimento de melhoria ou de piora do valor da função objetivo é aceito de acordo com determinada probabilidade, que está associada à temperatura do sistema físico.

Problemas de localização de *hubs* que usam SA são Chen (Chen, 2007), Rodriguez *et al.* (Rodriguez et al., 2007), e Abdinnour-Helm (Abdinnour-Helm, 2001).

### **Lógica fuzzy**

O uso da lógica fuzzy em localização de *hubs* tem sido recentemente considerado por Chou (Chou, 2010). Ele estudou a localização de *hubs* de transbordo de *containers* no sudeste de Ásia. Ele propôs um modelo de tomada de decisão multicritério com lógica fuzzy para selecionar o porto *hub* de transbordo. Davari *et al.* (Davari et al., 2010) estudaram o modelo *p-hub* de máxima confiabilidade e de alocação simples de Kim e O’Kelly (Kim e O’Kelly, 2009) na lógica fuzzy.

#### **3.4.3 Híbridos**

Os algoritmos híbridos se destacam por combinar todo tipo de método de solução para encontrar uma solução para um problema de otimização. Em geral, as combinações procuram reunir as grandes vantagens de métodos de solução distintos.

Por exemplo, Yaman (Yaman, 2008) apresenta algoritmos heurísticos baseados na relaxação lagrangeana e busca local para resolver problemas de localização de *q-hub*-mediana de alocação simples.



Problem	Article	Solution algorithm	Efficiency (# of nodes)	# of hubs
C-MA- <i>p</i> -HLP	Marín (2005)	Integer Linear Programming	40	–
	Gelareh and Pisinger (2011)	Mixed Integer Programming	15	–
C-SA- <i>p</i> -HLP	Costa et al. (2008)	Bi-criteria Integer Linear Programming	40	–
	Correia, Nickel, and Saldanha-da-Gama (2010a)	Mixed Integer Programming	50	–
	Correia, Nickel, and Saldanha-da-Gama (2010b)	Linear Programming	–	–
	Kratka, Milanovic, Stanimirovic, and Tosic (2011)	Mixed Integer Programming	–	–
	de Camargo and Miranda (2012)	Generalized Benders decomposition method	100	20
	Taghipourian et al. (2012)	Fuzzy Integer Linear Programming	20	4–7
U-MA- <i>p</i> -HLP	Skorin-Kapov, Skorin-Kapov, and O'Kelly (1996)	Linear Programming Relaxation	–	–
	Gelareh and Nickel (2007)	Bender decomposition method	–	–
	de Camargo, Miranda, and Luna (2008)	Benders decomposition	200	–
	de Camargo, Miranda, and Luna (2009)	Benders decomposition	50	–
	de Camargo, Miranda, Ferreira, and Luna (2009)	Nonlinear MIP- Generalized Benders decomposition algorithm	81	4
	Contreras, Cordeau, and Laporte (2011c)	Enhanced Bender decomposition method	500	–
	Gelareh and Nickel (2011)	Bender decomposition method	50	20
	Vasconcelos, Nassi, and Lopes (2011)	Integer Programming	12	–
	Vidovic et al. (2011)	Mixed Integer Programming	–	–
	Alumur, Nickel, et al. (2012)	Stochastic programming approach	25	4
U-SA- <i>p</i> -HLP	Alumur, Kara, and Karasan (2009)	Integer Programming	–	–
	O'Kelly (2009)	Linear Programming	550	–
	Contreras, Fernandez, and Marín (2010)	(Mixed Integer Programming) MIP	25	8
	Lin (2010)	Integer Linear Programming	–	–
U-SA-1-HLP	Alumur, Nickel, et al. (2012)	Stochastic programming approach	25	5
	Yang (2009)	Mixed Integer Programming	10	1
U-MA-M- <i>p</i> -HLP	Campbell (1991)	Integer Programming	–	–
	Campbell (1994a, 1994b)	Integer Programming	–	–
	Campbell (2009)	Mixed Integer Programming	40	16
	García, Landete, and Marín (2012)	Integer Programming-Branch and Cut	200	190
U-SA-M- <i>p</i> -HLP	Ebery (2001)	Mixed integer Linear Programming	–	–
	He, Chen, Chaovalitwongse, and Liu (2009)	Quadratic Programming	25	4
	Yaman (2009)	Mixed Integer Programming	81	12
	Puerto, Ramos, and Rodriguez-Chia (2011)	Mixed Integer Programming	20	10
	Yaman and Elloumi (2012)	Mixed Integer Programming	70	20
U-MA-T- <i>p</i> -HLP	Kara and Tansel (2000)	Mixed Integer Programming	25	–
	Ernst et al. (2009)	Mixed Integer Programming	100	10
U-SA-T- <i>p</i> -HLP	Ernst et al. (2009)	Mixed Integer Programming	100	10
	Yaman and Elloumi (2012)	Mixed Integer Programming	50	10

Figura 3.6: Métodos de solução exatos para o problema de localização de *hubs*.

Fonte: Farahani *et al.* (Farahani et al., 2013)

Problem	Article	Solution algorithm	Efficiency (# of nodes)	# of hubs
C-MA-p-HLP	Ebery, Krishnamoorthy, Ernst, and Boland (2000)	Nearest distance heuristic – branch and bound	200	–
	Rodríguez, Alvarez, and Barcos (2007)	Simulated annealing	52	–
	Rodríguez-Martín and Salazar-Gonzalez (2008)	Mixed integer linear programming with branch and cut based on decomposition method	25	10
C-SA-p-HLP	Ernst and Krishnamoorthy (1999)	Simulated annealing	–	–
	Yaman, Kara, and Tansel (2007)	Tabu search (with greedy algorithm) – branch and cut	49	–
	Chen (2008)	Heuristic method	200	–
	Randall (2008)	Ant colony optimization (ACO)	50	–
	Contreras, Díaz, and Fernandez (2009)	Lagrangian relaxation – a heuristic algorithm	200	–
	Randall, Hendtlass, and Lewis (2009)	Extremal optimization (a meta-heuristic algorithm)	–	–
	Lin and Lee (2010)	Lagrangian relaxation	–	–
	de Camargo, Miranda, and Ferreira (2011)	Outer-approximation/benders decomposition method	200	–
	Contreras, Díaz, and Fernandez (2011)	Branch and price – Lagrangian relaxation	200	–
	Lin, Lin, and Chen (2012)	Genetic algorithm	–	–
C-MA-M-p-HLP	Bollapragada, Camm, Rao, and Wu (2005)	Greedy algorithm	–	–
C-SA-V-p-HLP	Mohammadi, Jolai, and Rostami (2011)	Imperialist competitive algorithm and genetic algorithm	70	–
U-MA-p-HLP	O’Kelly (1987)	Nearest distance heuristic-quadratic integer	–	–
	Kliniewicz (1991)	Clustering heuristic	–	–
	Kliniewicz (1992)	Tabu search and greedy random algorithm	–	–
	Kliniewicz (1996)	Dual ascent and dual adjustment techniques within a branch and bound scheme	–	–
	Pamuk and Sepil (2001)	Tabu search (with greedy local algorithm)	25	5
	Mayer and Wagner (2002)	Dual ascent approach	–	–
	Marianov and Serra (2003)	Tabu search	50	4–5
	Rodríguez-Martín and Salazar-Gonzalez (2006)	A heuristic approach based on linear programming relaxation	50	–
	Canovas, García, and Marín (2007)	Dual ascent technique – branch and bound	120	–
	Thomadsen and Larsen (2007)	Branch and price (combination of column generation and branch and bound)	25	–
	Wagner (2007)	Clustering (genetic algorithm and Tabu search)	–	–
	Gelareh, Nickel, and Pisinger (2010)	MILP – Lagrangian decomposition method	20	7
	Contreras et al. (2011a)	Monte Carlo simulation based algorithm/benders decomposition method	50	–
	Aykin (1988)	Nearest distance heuristic	Plane	–
	Aykin and Brown (1992)	Location-allocation heuristics	Plane-Sphere	–
	O’Kelly (1992)	Heuristic algorithm	–	–
	Aykin (1995a)	Simulated annealing (greedy interchange)/branch and bound	–	–
	Aykin (1995b)	Location-routing heuristic algorithms	Plane	20
	O’Kelly et al. (1995)	Heuristic algorithm	25	–
	Abdinnour-Helm (1998)	Genetic algorithm and Tabu search (GATS)	–	–
	Abdinnour-Helm and Venkatavamanan (1998)	Genetic algorithm	–	–
	Pirkul and Schilling (1998)	Lagrangian relaxation	25	–
	Labbe, Yaman, and Gourdín (2005)	Branch and cut	–	–
U-SA-2-HLP	Topcuoglu, Corut, Ermis, and Yilmaz (2005)	Genetic algorithm	200	5
	Chen (2007)	Tabu search and simulated annealing	200	–
	Cunha and Silva (2007)	Genetic algorithm	25	–
	Contreras, Fernandez, and Marín (2009)	Lagrangian relaxation	100	8
	Filipovic, Kratica, Tosic, and Dugosija (2009)	Genetic algorithm inspired heuristic	200	–
	Iwasa, Saito, and Matsui (2009)	Randomized approximation algorithms based on LP relaxation (nearest neighbor algorithms)	–	–
	Silva and Cunha (2009)	Multi start Tabu search heuristic	200	–
	Han (2010)	Integer programming – Tabu search	50	11
	Catanzaro, Gourdín, Labbe, and Ozsoy (2011)	Branch and cut	20	–
	Ostresh (1975)	Location-allocation (shortest route)	–	–
U-SA-2-HLP	O’Kelly (1986a, 1986b)	Nearest distance heuristic	Plane	2
U-MA-M-p-HLP	Campbell (1996)	Greedy-interchange heuristic	–	–
	Ernst and Krishnamoorthy (1998)	Heuristic methods	–	–
	Sohn and Park (1998)	Nearest distance heuristic	25	3–4
	Sasaki, Suzuki, and Drezner (1999)	Branch and bound algorithm and greedy algorithm	50	2–4
	Sung and Jin (2001)	Clustering (dual-based approach)	–	–
	Kliniewicz (2002)	Tabu search – Greedy Random Adaptive Search Procedure (GRASP)	25	5
	Wagner (2008a)	LP relaxation – heuristic	50	5
	Eiselt and Marianov (2009)	Heuristic concentration procedure	50	5
	Cetiner, Sepil, and Sural (2010)	Iterative heuristic	81	6
	Ishfaq and Sox (2011)	Tabu search	100	6
	Ishfaq and Sox (2012)	Tabu search	25	5
	Aykin (1994)	Branch and bound (Lagrangian relaxation)	–	–
	Skorin-Kapov and Skorin-Kapov (1994)	Tabu search	–	–
		Branch and bound (Lagrangian relaxation)	–	–
	Smith, Krishnamoorthy, and Palaniswami (1996)	Simulated annealing	20	4
U-SA-M-p-HLP	Kratica, Stanimirovic, Tosic, and Filipovic (2007)	Genetic algorithm	200	20
	Yaman (2008)	Lagrangian relaxation and local search	81	25
	Limbourg and Jourquin (2009)	Flow based approach	20	10
	Takano and Arai (2009)	Genetic algorithm	25	4
	Blü, Urošević, Brimberg, and Mladenovic (2010)	General variable neighborhood search	1000	20
	Qu and Weng (2009)	Evolutionary approach based on path relinking	82	4
U-MA-V-p-HLP	Karimi and Bashiri (2011)	Heuristic algorithms	37	6
U-SA-V-p-HLP	Calik, Alumur, Kara, and Karasan (2009)	Tabu search	–	–
	Karimi and Bashiri (2011)	Heuristic algorithms	37	6
U-MA-T-p-HLP	Ernst, Hamacher, Jiang, Krishnamoorthy, and Woeginger (2002)	Innovative heuristic methods	–	–
U-SA-T-p-HLP	Ernst et al. (2002)	Innovative heuristic methods	–	–
	Calik et al. (2009)	Tabu-search based heuristic	–	–
	Gavrilouk (2009)	Heuristic based on aggregation	1000	20
	Meyer, Ernst, and Krishnamoorthy (2009)	Branch and bound algorithm and heuristic algorithm based on ant colony optimization (ACO)	1000	20
	Sim et al. (2009)	Heuristic methods	40	5

Figura 3.7: Algoritmos heurísticos e metaheurísticas para o problema de localização de *hubs*. Fonte: Farahani *et al.* (Farahani et al., 2013).

## 4

### Estratégias propostas

Neste capítulo, o problema fundamental de localização de *hubs* no sistema de transporte aéreo brasileiro doméstico é abordado, incorporando custos de transporte e medição de serviços mais realistas, através da identificação de *hubs* regionais e centrais, a fim de minimizar o fluxo na rede, via a resolução primeiramente de um modelo integrado. Em seguida, é proposto um método heurístico de duas fases, em vista de reduzir o tempo de resposta e superar a limitação de memória. Considerando como instância base o sistema de transporte aéreo brasileiro, com 150 aeroportos e fluxos de passageiros em voos domésticos, as duas estratégias propostas são comparadas através da realização de experimentos computacionais.

Como visto no Capítulo 1, em relação à literatura acadêmica existente, esta tese se diferencia nos seguintes aspectos:

- Resolve-se o problema fundamental de localização de *hubs*, proposto originalmente por Campbell (Campbell, 1994). Nesse problema não se considera viagens diretas, toda viagem inclui pelo menos um *hub* e no máximo dois *hubs* centrais, sendo que os *hubs* possuem alocação simples.
- Os aeroportos que concentram o fluxo regional de passageiros são integrados aos aeroportos que concentram o fluxo central de passageiros no sistema, considerando ainda todos os fluxos de origem e/ou destino não finalizados, sabe-se também que o fluxo de passageiros origem-destino O-D é diferente do fluxo destino-origem D-O.
- Como primeira estratégia, propõe-se um modelo matemático que integra a decisão de localização de *hubs* centrais e regionais visando a minimização das distâncias-tempos.
- Como segunda estratégia, propõe-se um método de solução de duas fases para resolver o problema fundamental de localização de *hubs* com alocação simples.
- Propõe-se um software de visualização dos resultados obtidos com as duas estratégias propostas.

- Diversos cenários podem ser criados através do software proposto, assim, respeitando-se alguns critérios, o número de *hubs* regionais, *hub* centrais e o fator de desconto, associado à incorporação de hubs na rede, podem ser calibrados. O tipo de distância euclidiana ou esférica, também pode ser definido *a priori* pelo usuário.

O modelo matemático proposto como primeira estratégia apresenta as seguintes características: espaço de solução em rede, o critério *minisum* e a determinação exógena do número de *hubs* regionais e centrais. Considerou-se o problema não capacitado, sem custo de localização de *hubs*, com alocação simples e sem custo de conexão entre um *hub* e um *spoke*.

Para realizar os experimentos computacionais com as duas estratégias propostas para resolver o problema fundamental de localização de *hubs*, considera-se uma instância base formada por 150 aeródromos e aeroportos atendidos por alguma companhia brasileira concessionária do transporte aéreo de passageiros e de cargas, conforme dados da ANAC (ANAC, 2011). Com relação ao transporte de passageiros, as localizações geográficas (latitude e longitude) dos aeroportos envolvidos são apresentadas na Tabela A.1. Vale lembrar que os fluxos de passageiros em voos domésticos são mostrados nas Figuras 2.2 e 2.3, observando que os aeroportos em destaque na Figura 2.2 não têm volume significativo de tráfego nem boa infraestrutura em termos de terminais de passageiros. É considerada também a lista dos 114 aeródromos e aeroportos atendidos por alguma companhia brasileira concessionária no transporte aéreo de carga, com suas localizações geográficas (latitude e longitude) dadas na Tabela A.2. Vale lembrar que os fluxos de carga em voos domésticos são mostrados na Figura 2.4.

## 4.1

### Estratégia Modelo integrado

Nesta estratégia se introduz um modelo matemático que integra a localização simultânea de *hubs* regionais, para consolidação de percursos de fluxos menores, e *hubs* centrais, para consolidação de fluxos maiores, visando a minimização do fluxo total percorrido.

#### 4.1.1

##### Modelo integrado

Sejam  $N$  o conjunto de  $n$  nós ou pontos dados,  $i, j, k, m \in N$ ;  $p (< n)$  o número de *hubs* regionais a serem localizados;  $q (< p)$  o número de *hubs* centrais a serem localizados;  $C_{ijkm}$  o custo total do fluxo que passa por  $i, j, k$  e  $m$ ;  $w_i$  o peso associado a cada nó  $i$ ;  $W_{ij}$  o fluxo entre os nós  $i$  e  $j$ ;  $[d_{ij}]_{n \times n}$  a

matriz simétrica das distâncias, em que cada elemento  $d_{ij}$  é a distância do nó  $i$  ao nó  $j$ . Considere ainda as variáveis de decisão  $[z_{ij}]_{n \times n}$  a matriz de alocações, onde  $z_{ij} = 1$  se o nó *spoke*  $i$  é alocado ao *hub* regional  $j$ , e  $z_{ij} = 0$ , caso contrário ( $z_{jj} = 1$  indica que  $j$  é um *hub* regional e  $z_{jj} = 0$ , caso contrário);  $y_{ijkm}$  o fluxo do nó origem  $i$  ao nó destino  $j$  que passa pelos *hubs* centrais  $k$  e  $m$  nesta ordem (se  $k = m$  então o fluxo passa por um único *hub* central); e  $[x_{ik}]_{n \times n}$  a matriz de alocações, onde  $x_{ik} = 1$  se o nó  $i$  é alocado ao *hub* central  $k$  e  $x_{ik} = 0$  caso contrário ( $x_{kk} = 1$  indica se  $k$  é um *hub* e  $x_{kk} = 0$ , caso contrário). Então, o modelo integrado proposto é formulado por:

$$\begin{aligned} \text{minimizar} \quad & \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in N} \sum_{m \in N} W_{ij} C_{ijkm} y_{ijkm} + \\ & + \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} w_i d_{ij} z_{ij} \end{aligned} \quad (4-1)$$

$$\text{sujeito a} \quad \sum_{j \in N} z_{jj} = p \quad (4-2)$$

$$\sum_{k \in N} x_{kk} = q \quad (4-3)$$

$$\sum_{j \in N} z_{ij} = 1 \quad i \in N \quad (4-4)$$

$$\sum_{k \in N} x_{ik} = 1 \quad i \in N \quad (4-5)$$

$$\sum_{m \in N} y_{ijkm} = x_{ik} \quad i, j, k \in N \quad (4-6)$$

$$\sum_{k \in N} y_{ijkm} = x_{jm} \quad i, j, m \in N \quad (4-7)$$

$$z_{ij} \leq z_{jj} \quad i, j \in N \quad (4-8)$$

$$x_{ij} \leq x_{jj} \quad i, j \in N \quad (4-9)$$

$$x_{jj} \leq z_{jj} \quad j \in N \quad (4-10)$$

$$y_{ijkm} \geq 0 \quad i, j, k, m \in N \quad (4-11)$$

$$x_{ik} \in \{0, 1\} \quad i, k \in N \quad (4-12)$$

$$z_{ij} \in \{0, 1\} \quad i, j \in N, \quad (4-13)$$

onde o custo total do fluxo é dado por  $C_{ijkm} = d_{ik} + d_{jm} + \alpha d_{km}$  e  $\alpha$  é interpretado como o fator de economia de escala conseguida pela agregação de fluxos com a introdução de *hubs*. A função objetivo (4-1) a ser minimizada representa os custos envolvidos com os fluxos com a introdução de *hubs* regionais e centrais, considerando os pesos dos fluxos em cada aeroporto ( $w_i$ ) e os pesos dos fluxos em cada par origem-destino ( $W_{ij}$ ). A restrição (4-2)

garante que há exatamente  $p$  *hubs* regionais; já a restrição (4-3) indica que  $q$  *hubs* centrais devem ser localizados; as restrições em (4-4) indicam que cada nó  $i$  é conectado somente a um único *hub* regional ou mediana  $j$ ; em (4-5) as restrições asseguram que cada nó é alocado a exatamente um único *hub* central; as restrições (4-6) asseguram que  $x_{ik}$  é factível se a instalação  $i$  é alocada ao *hub* central  $k$  independente do destino; enquanto que as restrições em (4-7) asseguram que o caminho é factível somente se  $j$  é alocado no *hub* central  $m$  independente da origem. As restrições em (4-8) afirmam que cada nó deve ser alocado a um *hub* regional ou mediana; em (4-9) as restrições garantem que um nó somente é alocado a um *hub* central já localizado; em (4-10) as restrições garantem que um nó seja *hub* central somente se este é um *hub* regional já localizado. As restrições em (4-11) indicam que as decisões de fluxo são não negativas, enquanto que as restrições em (4-12) e (4-13) definem variáveis de decisão de tipo binário impostas no modelo.

#### 4.1.2

##### Resultados computacionais

O modelo integrado proposto foi resolvido com o software CPLEX, versão 12.4 disponível no pacote AIMMS versão 12.1. O método de solução aplicado foi o algoritmo de *branch-and-cut*, que vem a ser o método de solução padrão do CPLEX para os problemas de programação inteira mista. A implementação do sistema de visualização gráfica foi programado na linguagem Visual C++ versão 9.0, usando as ferramentas Qt para a interface gráfica e CGAL para os diagramas de Voronoi. Além disso, os experimentos numéricos foram efetuados num computador Intel PC Celeron com 2,7 GHz e 512MB RAM, sob o sistema operacional de 32 Bits Windows XP.

Nesta tese, juntamente com recursos gráficos, foi utilizado o diagrama de Voronoi no software de visualização proposto para mostrar os resultados obtidos com a resolução do modelo integrado. Proposto originalmente por George Voronoi na metade do século XIX (Aurenhammer, 1991), o diagrama de Voronoi foi redescoberto por Okabe *et al.* (Okabe et al., 2000). Ele é um tipo especial de partição do espaço métrico determinado por distâncias euclidianas a partir de um conjunto específico de pontos sementes no espaço bidimensional. Esta partição, com pelo menos 2 pontos sementes, resulta em polígonos convexos bidimensionais onde, cada polígono contém exatamente um ponto semente e pontos interiores que estão mais próximos a esse ponto semente do que a qualquer outro ponto semente. Como em Boots e South (Boots e South, 1997), o diagrama ordinário de Voronoi pode ser definido como segue.

Seja  $S = \{x_1, x_2, \dots, x_p\}$  um conjunto de  $p$  pontos sementes conhecidos em  $\mathbb{R}^2$ . A região  $V(x_j) = \{x \in \mathbb{R}^2 : \|x - x_j\|_2 \leq \|x - x_i\|_2, j \neq i, i, j = 1, \dots, p\}$  é chamada de polígono ordinário de Voronoi do ponto semente  $x_j$ , onde  $\|\cdot\|_2$  denota a norma euclidiana. De fato,  $V(x_j)$  contém todos os pontos que estão mais próximos ao ponto semente  $x_j$  do que a qualquer outro ponto. O conjunto  $\Gamma(P) = \{V(x_1), \dots, V(x_p)\}$  é uma partição de  $\mathbb{R}^2$ , chamado de diagrama ordinário de Voronoi do conjunto de pontos sementes.

Devido à limitada quantidade de memória do computador utilizado, foi criada uma instância menor com  $n = 24$  aeroportos com seus correspondentes fluxos de passageiros. A escolha do tamanho da instância tem por base o critério de volume de passageiros em voos domésticos no ano de 2010, mostrado na Tabela 4.1, conforme dados da ANAC (ANAC, 2011). Esses valores foram consolidados a partir da contagem do número de passageiros com fluxo de entrada ou saída em cada aeroporto, agrupando aeroportos segundo o volume mínimo de passageiros. Esta tabela mostra que 40 aeroportos transportaram mais de 330 mil passageiros, dentre estes, 34 aeroportos transportaram mais de 500 mil passageiros, dentre estes, 24 aeroportos transportaram mais de 1 milhão de passageiros, dentre estes, 19 aeroportos transportaram mais de 2 milhões de passageiros, dentre estes, 10 aeroportos transportam mais de 5 milhões de passageiros.

Tabela 4.1: Volume de passageiros por aeroporto.

Número de aeroportos	Volume mínimo de passageiros
10	5.000.000
19	2.000.000
24	1.000.000
34	500.000
40	330.000

Portanto,  $n = 24$  representa o número de aeroportos que tiveram volume total mínimo de 1 milhão de passageiros no ano de 2010. Este conjunto particular de aeroportos foi determinado via resolução do modelo da  $p$ -mediana, considerando a instância base e seu fluxo de passageiros. A Tabela 4.2 apresenta a lista dos 24 aeroportos considerados nesta instância, identificando cada aeroporto com o seu código ICAO e município correspondente.

Para determinar o peso de cada aeroporto  $w_i$  em (4-1), considerou-se como peso de um aeroporto o somatório dos fluxos de passageiros de voos domésticos que chegam e que partem do aeroporto  $i$ . Assim como, para

Tabela 4.2: Lista dos 24 aeroportos brasileiros usados no modelo integrado.

Nro. Aeroporto	Município	Nro. Aeroporto	Município		
1	SBEG	Manaus - AM	13	SBRF	Recife - PE
2	SBPS	Porto Seguro - BA	14	SBC T	Curitiba - PR
3	SBSV	Salvador - BA	15	SBFI	Foz de Iguaçu - PR
4	SBFZ	Fortaleza - CE	16	SBLO	Londrina - PR
5	SBBR	Brasilia - DF	17	SBGL	Rio de Janeiro - RJ
6	SBVT	Vitória - ES	18	SBNT	Parnamirim - RN
7	SBGO	Goiânia - GO	19	SBPV	Porto Velho - RO
8	SBSL	São Luis - MA	20	SBPA	Porto Alegre - RS
9	SBCF	Confins - MG	21	SBFL	Florianópolis - SC
10	SBCG	Campo Grande - MS	22	SBKP	Campinas - SP
11	SBCY	Várzea Grande - MT	23	SBSP	São Paulo - SP
12	SBBE	Belém - PA	24	SBGR	Guarulhos - SP

determinar o peso do fluxo  $W_{ij}$  entre os aeroportos  $i$  e  $j$  considerou-se o fluxo de passageiros da origem  $i$  ao destino  $j$ . Sabe-se ainda que  $W_{ij} \neq W_{ji}$ .

O cálculo das distâncias consideradas parâmetros no modelo integrado proposto usa a fórmula de Haversine (Sinnot, 1984), que determina a distância em quilômetros entre dois pontos sobre uma esfera (neste caso, a Terra) a partir das coordenadas geográficas (latitude e longitude). Para o problema de localização, considera-se que a matriz distância seja simétrica e conhecida. Porém, cenários utilizando a distância euclidiana podem ser criados a critério do usuário.

De acordo com a fórmula de Haversine, dado um par de aeroportos  $O - D$  com suas respectivas coordenadas geográficas  $(O.x, O.y)$  e  $(D.x, D.y)$ , em graus decimais, primeiramente transforma-se estas coordenadas em radianos ( $r_{O.x} = \pi O.x/180, r_{O.y} = \pi O.y/180$ ) e ( $r_{D.x} = \pi D.x/180, r_{D.y} = \pi D.y/180$ ), e em seguida calcula-se a distância entre  $O - D$ , em quilômetros, fazendo

$$a = \sin^2((r_{D.x} - r_{O.x})/2) + \cos(r_{O.x}) \cos(r_{D.x}) \sin^2((r_{D.y} - r_{O.y})/2)$$

$$d(O, D) = 2R \arctan(\sqrt{a}/\sqrt{1-a}),$$

onde  $R = 6.378\text{km}$  é o raio da Terra. Cabe ressaltar que,  $d(O, D) = 0$  se e somente se  $O = D$ , e que  $d(O, D) = d(D, O)$ .

Como estudado por Costa *et al.* (Costa et al., 2010), o número de *hubs* centrais no sistema de transporte aéreo brasileiro deve ser de 3 a 6 devido à adequação do grau de agrupamento de aeroportos na rede. Assim, para realizar os testes computacionais com o modelo integrado com a instância



de  $n=24$  aeroportos, foram considerados o número fixo de  $p = 10$  e  $p = 19$  *hubs* regionais, conforme critério de volume mínimo de passageiros de voos domésticos anual, visto na Tabela 4.1, e o número de *hubs* centrais variando de 2 a 6. Semelhante a Figueiredo *et al.* (Figueiredo et al., 2012), foi considerado o fator de desconto  $\alpha = 0,6$  no modelo integrado. Em cada teste foram geradas 28.827 restrições, com 332.929 variáveis, sendo 1.152 inteiras. Os resultados obtidos com a estratégia do modelo integrado para cada caso estudado são mostrados na Tabela 4.3, onde o número de *hubs* regionais ( $p$ ), o número de *hubs* centrais ( $q$ ), o tempo de solução em segundos e o valor ótimo da função objetivo são apresentados.

Tabela 4.3: Resultados da estratégia do modelo integrado.

$p$ -hubs	$q$ -hubs	Tempo Solução (s)	Função Objetivo
10	2	109,63	1,0199e11
	3	93,13	8,8263e10
	4	103,97	8,2830e10
	5	112,77	7,9195e10
	6	86,06	7,5449e10
19	2	113,14	9,1357e10
	3	89,97	7,7322e10
	4	93,81	7,2189e10
	5	119,16	6,8554e10
	6	92,22	6,4808e10

A Tabela 4.4 mostra o resultado com  $p = 10$  fixo e  $q = 2, \dots, 6$ , enquanto a Tabela 4.5 mostra o resultado para  $p = 19$  fixo e  $q = 2, \dots, 6$ . Cada tabela identifica o *hub* regional com o seu código ICAO e o município correspondente, os *spokes* alocados aos *hubs* regionais são também identificados com código ICAO. Verifica-se que nos casos  $p = 10$  e  $p = 19$  *hubs* regionais, a localização e alocação dos *hubs* regionais aos *spokes* foram idênticos para o número de *hubs* centrais  $q = 2, \dots, 6$ .

Os resultados dos testes computacionais com o modelo integrado com relação à localização de  $q$  *hubs* centrais e suas correspondentes alocações são apresentados nas Tabelas 4.6, com  $p = 10$  fixo, e 4.7, com  $p = 19$  fixo. Cada tabela identifica o *hub* central com o seu código ICAO e o município correspondente, os *hubs* regionais alocados aos *hubs* centrais também são identificados com o código ICAO.

A Tabela 4.8 apresenta os resultados consolidados para os casos  $p = 10$  e  $p = 19$  com  $q = 2, \dots, 6$ . Mesmo variando  $p$  e  $q$  os resultados se mostraram consistentes e semelhantes. Em todos os testes o aeroporto Deputado Luís

Tabela 4.4: Localização de *hubs* regionais e suas alocações obtidas com a estratégia do modelo integrado com  $p = 10$ .

Nro. <i>hub</i> regional	Município	<i>spokes</i>
1	SBEG	Manaus - AM
2	SBSV	Salvador - BA
3	SBFZ	Fortaleza - CE
4	SBBR	Brasília - DF
5	SBBE	Belém - PA
6	SBRF	Recife - PE
7	SBCT	Curitiba - PR
8	SBGL	Rio de Janeiro - RJ
9	SBPA	Porto Alegre - RS
10	SBGR	Guarulhos - SP

Eduardo Magalhães (SBSV) em Salvador - BA e um aeroporto em São Paulo, seja Congonhas (SBSP) ou Governador André Franco Montoro (SBGR), foram apontados como *hub* centrais. À medida que o número de *hub* centrais  $q$  a serem localizados aumenta, os aeroportos apontados com *hub* centrais são comumente o aeroporto Internacional Presidente Juscelino Kubitchek (SBBR) em Brasília - DF, aeroporto Internacional Antônio Carlos Jobim (SBGL) no Rio de Janeiro - RJ, aeroporto Guararapes ou Gilberto Freyre (SBRF) em Recife - PE, e aeroporto Val De Cans ou Júlio Cezar (SBBE) em Belém - PA.

Na Figura 4.1 os resultados da estratégia do modelo integrado podem ser vistos através do software de visualização proposto. Esses resultados se referem à rede de 24 aeroportos com a localização de 10 *hubs* regionais, em cor vermelho, e de 3 *hubs* centrais, em cor preto. Os segmentos de reta azuis mostram a alocação dos aeroportos aos *hubs* regionais, os segmentos de reta verdes mostram os aeroportos alocados aos *hubs* centrais localizados e os segmentos de reta em lilás mostram a interconexão entre os *hubs* centrais. Finalmente, tomando como sementes os *hubs* regionais, o diagrama de Voronoi mostra as regiões de abrangência de cada *hub* regional em turquesa.

## 4.2

### Estratégia do método de duas fases

Nesta segunda estratégia, um método heurístico é proposto, baseado na ideia de Figueiredo *et al.* (Figueiredo et al., 2012), que decompõem o problema de localização de *hubs* em duas fases, na primeira são identificados os *hubs* regionais e na segunda são identificados *hubs* centrais, não esquecendo de

Tabela 4.5: Localização de *hubs* regionais e suas alocações obtidas com a estratégia do modelo integrado com  $p = 19$ .

Nro.	<i>hub</i> regional	Município	<i>spokes</i>
1	SBEG	Manaus - AM	SBEG
2	SBPS	Porto Seguro - BA	SBPS
3	SBSV	Salvador - BA	SBSV
4	SBFZ	Fortaleza - CE	SBFZ
5	SBBR	Brasília - DF	SBBR, SBGO
6	SBVT	Vitória - ES	SBVT
7	SBSL	São Luis - MA	SBSL
8	SBCF	Confins - MG	SBCF
9	SBCG	Campo Grande - MS	SBCG
10	SBCY	Várzea Grande - MT	SBCY
11	SBBE	Belém - PA	SBBE
12	SBRF	Recife - PE	SBRF, SBNT
13	SBCT	Curitiba - PR	SBCT, SBLO
14	SBFI	Foz de Iguaçu - PR	SBFI
15	SBGL	Rio de Janeiro - RJ	SBGL
16	SBPV	Porto Velho - RO	SBPV
17	SBPA	Porto Alegre - RS	SBPA
18	SBFL	Florianópolis - SC	SBFL
19	SBGR	Guarulhos - SP	SBKP, SBSP, SBGR

considerar os fluxos não concluídos.

#### 4.2.1

##### Primeira fase

O método de duas fases proposto considera toda a rede de aeroportos na primeira fase, a fim de identificar primeiramente os pontos de concentração de fluxo de pequenos aeroportos em regiões com baixo número de passageiros, chamados de *hubs* regionais. Para isso, resolve-se o modelo da  $p$ -mediana (3-1)-(3-5), em que o valor de  $p$  é fixado, a distância entre cada par de aeroportos é calculada usando a fórmula Haversine, como na estratégia anterior, assim como é considerado conhecido o fluxo de passageiros entre cada par origem-destino.

Para determinar o peso de cada aeroporto  $w_i$  em (3-1), que é um parâmetro do modelo da  $p$ -mediana, considerou-se o somatório dos fluxos de passageiros de voos domésticos que chegam e que partem do aeroporto  $i$ , de acordo com os dados disponibilizados pela ANAC (ANAC, 2011).

A escolha do número fixo de *hubs* regionais ( $p$ ), a ser considerado na primeira fase do método proposto, se baseia no critério de volume mínimo de passageiros em voos domésticos no ano de 2010, visto na Tabela 4.1.

Tabela 4.6: Localização de *hubs* centrais e suas alocações obtidas com a estratégia do modelo integrado com  $p = 10$  e  $q = 2, \dots, 6$ .

$q$ -hubs	hub central	Município	hub regional
2	SBSV	Salvador - BA	SBSV, SBFZ, SBBE, SBRF
	SBGR	Guarulhos - SP	SBEG, SBBR, SBCT, SBGL, SBPA, SBGR
3	SBSV	Salvador - BA	SBSV, SBFZ, SBRF
	SBBR	Brasília - DF	SBEG, SBBR, SBBE
	SBGR	Guarulhos - SP	SBCT, SBGL, SBPA, SBGR
4	SBSV	Salvador - BA	SBSV, SBFZ, SBRF
	SBBR	Brasília - DF	SBEG, SBBR, SBBE
	SBGL	Rio de Janeiro - RJ	SBGL
	SBGR	Guarulhos - SP	SBCT, SBPA, SBGR
5	SBSV	Salvador - BA	SBSV
	SBBR	Brasília - DF	SBEG, SBBR, SBBE
	SBRF	Recife - PE	SBFZ, SBRF
	SBGL	Rio de Janeiro - RJ	SBGL
	SBGR	Guarulhos - SP	SBCT, SBPA, SBGR
6	SBSV	Salvador - BA	SBSV
	SBBR	Brasília - DF	SBBR
	SBBE	Belém - PA	SBEG, SBBE
	SBRF	Recife - PE	SBFZ, SBRF
	SBGL	Rio de Janeiro - RJ	SBGL
	SBGR	Guarulhos - SP	SBCT, SBPA, SBGR

A ideia desta primeira fase é ilustrada na Figura 4.2, onde os círculos pretos são aeroportos, as linhas cinzas são as ligações origem-destino antes da introdução de *hubs*, os quadrados verdes representam os *hubs* regionais localizados nesta fase e as linhas azuis são as ligações entre *hubs* e *spokes*. Assim, nesta primeira fase, os tipos de fluxo encontrados (veja Figura 3.4) são do tipo (a) *spoke-hub* regional, (b) *hub* regional-*spoke* e (c) *spoke-hub* regional-*spoke*. Finalmente, os fluxos origem-destino finalizados nesta primeira fase não serão mais considerados na segunda fase, enquanto que os fluxos dos *spokes* que não finalizaram seu percurso são adicionados a seus correspondentes *hubs* regionais.

#### 4.2.2 Segunda Fase

Após a identificação dos aeroportos de concentração regional de passageiros, agora com uma rede de aeroportos em número menor, considerando ainda os trajetos de origem e/ou destino não finalizados, parte-se para a segunda fase do método em que aeroportos de maior concentração de passageiros, ou

seja, *hubs* centrais são identificados com o auxílio do modelo de *q-hub*-mediana (3-12)-(3-19).

Nesta segunda fase, a matriz das distâncias é determinada de maneira similar à primeira fase, eliminando da rede os aeroportos que foram alocados aos *hubs* regionais. Com relação à matriz de pesos  $w_{ij}$ , parâmetro do modelo

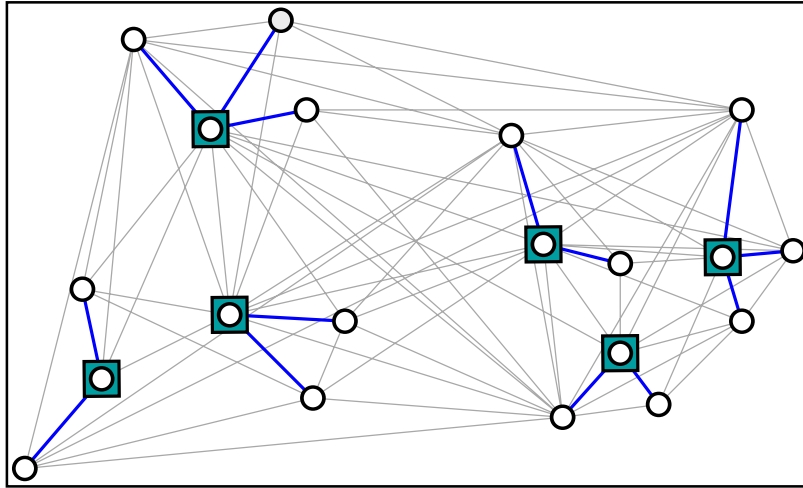


Figura 4.2: Ideia geral da primeira fase do método de duas fases.

de  $q$ -hub-mediana (3-12)-(3-19) usado na segunda fase do método, cada peso  $w_{ij}$  representa o fluxo de passageiros de voos domésticos com origem em  $i$  e destino em  $j$ , sabendo que  $w_{ij} \neq w_{ji}$ .

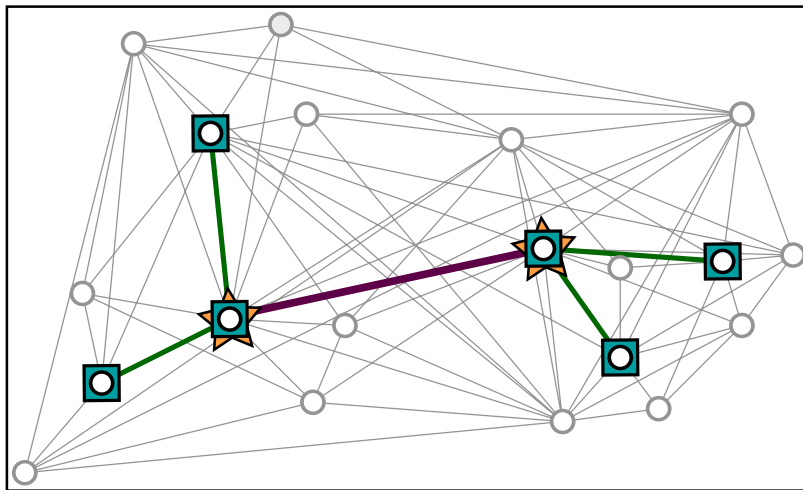


Figura 4.3: Ideia geral da segunda fase do método de duas fases.

A ideia desta segunda fase é ilustrada na Figura 4.3, onde as linhas cinzas são as ligações entre origem-destino antes da localização de *hubs*, os quadrados verdes são os *hubs* regionais, os círculos em cinza são os *spokes* alocados na primeira fase, as estrelas amarelas são os *hubs* centrais localizados nesta fase e a linha roxa representa a ligação entre *hubs* centrais. Assim, nesta segunda fase, todos os tipos de fluxos da Figura 3.4 são considerados.

### 4.2.3

#### Resultados Computacionais

Nesta subseção, os resultados computacionais obtidos com a estratégia do método de duas fases são apresentados. Os modelos matemáticos da  $p$ -

mediana e de  $q$ -hub-mediana foram resolvidos com o solver CPLEX, versão 12.4 disponível no pacote AIMMS versão 12.1. O método de solução aplicado foi o algoritmo de *branch-and-cut*, que vem a ser o método de solução padrão do CPLEX dos problemas de programação inteira mista. A implementação do sistema de visualização gráfica foi programado na linguagem Visual C++ versão 9.0, usando as ferramentas Qt para a interface gráfica e CGAL para o diagrama de Voronoi. Além disso, os experimentos numéricos foram efetuados num computador Intel PC Celeron com 2,7 GHz e 512MB RAM, sob o sistema operacional de 32 Bits Windows XP. A técnica de diagrama de Voronoi, mencionada anteriormente, também é aqui usada para visualizar os resultados computacionais junto ao software de visualização proposto.

Para realizar os testes computacionais, a instância base do problema fundamental de localização de *hubs* foi considerada, abrangendo 150 aeroportos do sistema de transporte aéreo brasileiro. Os resultados da segunda estratégia foram obtidos para  $p = 10, 19, 24, 34, 40$  (*hubs* regionais), na primeira fase, e para  $q = 2, 3, 4, 5, 6$  (*hubs* centrais), na segunda fase. Os valores de  $p$  obedecem o critério de fluxo mínimo de passageiros conforme Tabela 4.1, enquanto que os valores de  $q$  obedecem o critério da adequação do grau de agrupamento de aeroportos na rede dado por Costa *et al.* (Costa et al., 2010).

Na Tabela 4.9, os resultados computacionais para cada caso estudado são apresentados, a primeira coluna indica o número de *hubs* regionais ( $p$ ), a segunda coluna indica o número de *hubs* centrais ( $q$ ), na terceira coluna são informados os tempos de solução em segundo e na quarta coluna são apresentados os valores ótimos da função objetivo (3-12). Semelhante a Figueiredo *et al.* (Figueiredo et al., 2012), foi considerado o fator de desconto  $\alpha = 0.6$  no modelo  $q$ -hub-mediana (3-12)-(3-19).

As Tabelas A.3, A.4, A.5, A.6 e A.7 no A apresentam resultados da primeira fase do método de duas fases proposto para os casos de  $p = 10$ ,  $p = 19$ ,  $p = 24$ ,  $p = 34$  e  $p = 40$  *hubs* regionais, respectivamente. Cada tabela identifica o *hub* regional e seus correspondentes *spokes* com seus códigos ICAO.

As Tabelas A.8, A.9, A.10, A.11 e A.12 no Apêndice A apresentam resultados dos testes computacionais para  $q = 2, \dots, 6$  *hubs* centrais localizados na segunda fase do método de duas fases proposto para os subconjuntos de  $p = 10$ ,  $p = 19$ ,  $p = 24$ ,  $p = 34$  e  $p = 40$  *hubs* regionais, respectivamente.

Para efeito de análise dos resultados dos experimentos realizados, a Tabela 4.10 apresenta os *hubs* centrais localizados em todos os testes. Mesmo variando  $p$  e  $q$  os resultados se mostraram consistentes e semelhantes, com diferença de no máximo um *hub* central. Na terceira coluna, são apresentadas as alocações idênticas encontradas para os *hubs* centrais localizados. Especifica-

mente, todos os *hubs* regionais localizados quando fixou-se  $p = 10, 19, 24, 34, 40$  são alocados aos *hubs* centrais Deputado Luis Eduardo Magalhães (SBSV) em Salvador - BA e Guarulhos (SBGR) em São Paulo - SP localizados quando  $q = 2$ .

A Figura 4.4 mostra o resultado gráfico da primeira fase do método proposto, quando são localizados na rede de 150 aeroportos os *hubs* regionais através da resolução do modelo da  $p$ -mediana (3-1)-(3-5). Os pontos em vermelho representam os aeroportos e os pontos em preto representam 24 *hubs* regionais localizados, que possuem um fluxo anual de mais de um milhão de passageiros. Os segmentos de reta azuis mostram a alocação dos aeroportos aos *hubs* regionais localizados. Finalmente, tomando como sementes os *hubs* regionais, o diagrama de Voronoi mostra as regiões de abrangência de cada *hub* regional em turquesa.

A Figura 4.5 mostra o resultado gráfico referente à segunda fase do método proposto, quando são localizados, numa rede com menos aeroportos, os *hubs* centrais através da resolução do modelo da  $q$ -hub mediana (3-12)-(3-19). Os pontos em preto representam os *hubs* regionais já localizados na fase anterior, e os pontos em vermelho são os *hubs* centrais localizados. Os segmentos de reta verdes mostram os aeroportos alocados aos *hubs* centrais localizados, e os segmentos de reta em lilás mostram a conexão entre os *hubs* centrais. Dos resultados computacionais, os aeroportos a servirem de *hubs* centrais no Brasil são: Aeroporto Internacional Deputado Luis Eduardo Magalhães (SBSV), em Salvador - BA, Aeroporto Internacional Presidente Juscelino Kubitchek (SBBR), em Brasília - DF e Aeroporto Congonhas (SBSP) em São Paulo - SP.

### 4.3

#### Comparação de resultados

Nesta seção, as duas estratégias propostas serão comparadas através de experimentos computacionais e instâncias distintas. Primeiramente, compara-se os resultados das estratégias propostas em termos do tempo computacional para uma instância reduzida de aeroportos. Em seguida, um teste computacional é realizado com uma malha de voos domésticos de uma empresa aérea em particular, mostrando conformidade com as localizações de *hubs* centrais e regionais quando considera-se uma malha com todos os voos domésticos.



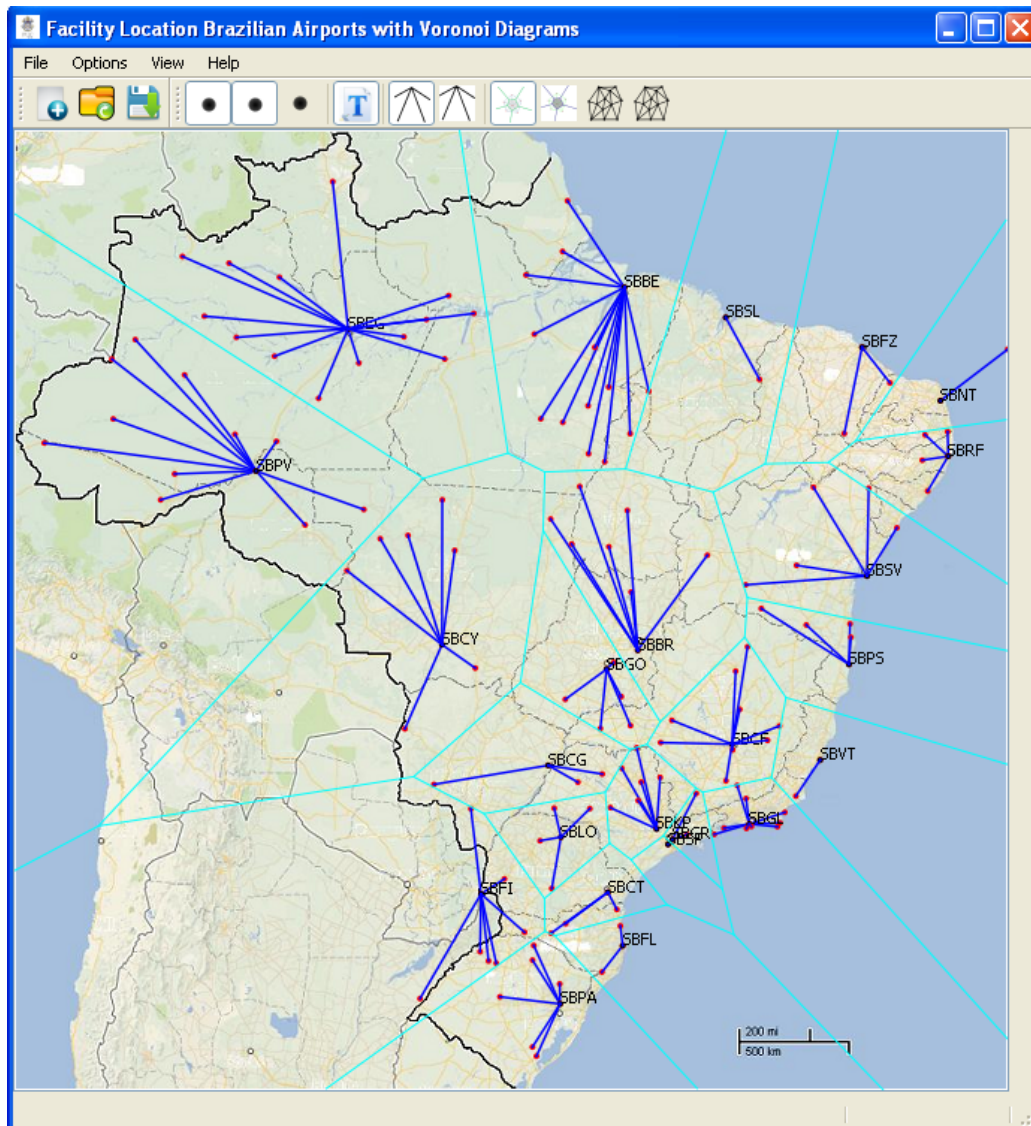


Figura 4.4: Visualização do resultado da primeira fase do método de duas fases para 150 aeroportos e 24 *hub* regionais.

#### 4.3.1

##### Modelo integrado versus método de duas fases

A comparação entre as estratégias propostas é feita com base no tempo de solução. Para isso, considerou-se a instância com 24 aeroportos, dada na Tabela 4.2 e já usada nos testes computacionais com o modelo integrado, devido à incapacidade do modelo integrado obter resultados para instâncias com um número maior de aeroportos na rede no ambiente computacional utilizado nos testes.

Como os valores dos parâmetros da estratégia do método de duas fases são idênticos aos valores dos parâmetros do modelo integrado, fixou-se  $p = 10$  e  $q = 2, \dots, 6$  para obter os tempos de solução de cada estratégia de cada caso.

Na primeira fase da estratégia do método de duas fases, foram geradas

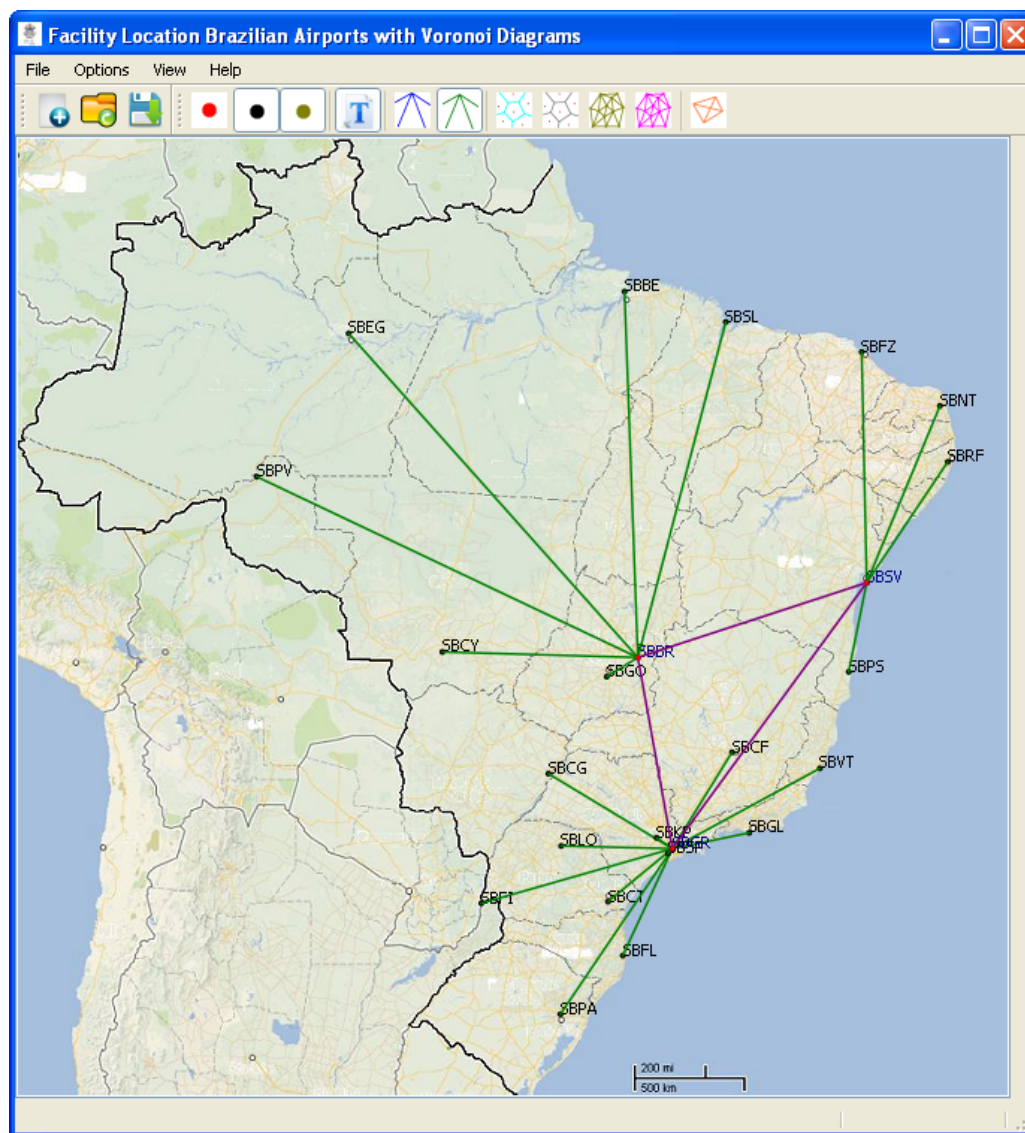


Figura 4.5: Visualização do resultado da segunda fase do método de duas fases para 150 aeroportos, 24 *hubs* regionais e 3 *hubs* centrais.

578 restrições, com 576 variáveis inteiras, o tempo de solução foi de 0,08s e o valor da função objetivo foi  $1,3047e10$ . A localização dos *hubs* regionais e suas correspondentes alocações foram iguais às encontradas via solução do modelo integrado, listados na Tabela 4.4.

Na segunda fase do método foram geradas 2102 restrições, 10001 variáveis reais e 100 variáveis inteiras. O tempo de solução e o valor da função objetivo são mostrados na Tabela 4.11. Os *hubs* centrais encontrados e suas alocações aos *hubs* regionais *spokes* foram iguais aos encontrados com a solução do modelo integrado, listados na Tabela 4.6.

Na Figura 4.6 os resultados da primeira fase do método de duas fases é visualizada, estes resultados se referem à rede de 24 aeroportos em cor vermelho, com a localização de 10 *hubs* regionais em cor preto. Os segmentos

de reta azuis mostram a alocação dos aeroportos aos *hubs* regionais localizados. Finalmente, tomando como sementes os *hubs* regionais, o diagrama de Voronoi mostra as regiões de abrangência de cada *hub* regional em turquesa. De modo semelhante, a Figura 4.7 visualiza os resultados da segunda fase, onde os resultados se referem à rede de 10 *hubs* regionais em cor preto, localizados na fase anterior, e os pontos em mostarda são os *hubs* centrais localizados. Os segmentos de reta verdes mostram a alocação dos aeroportos aos *hubs* centrais localizados. Finalmente, os segmentos de reta em lilás mostram a interconexão entre *hubs* centrais. Observa-se que estes resultados são iguais aos resultados encontrados com a estratégia do modelo integrado mostrada na Figura 4.1.

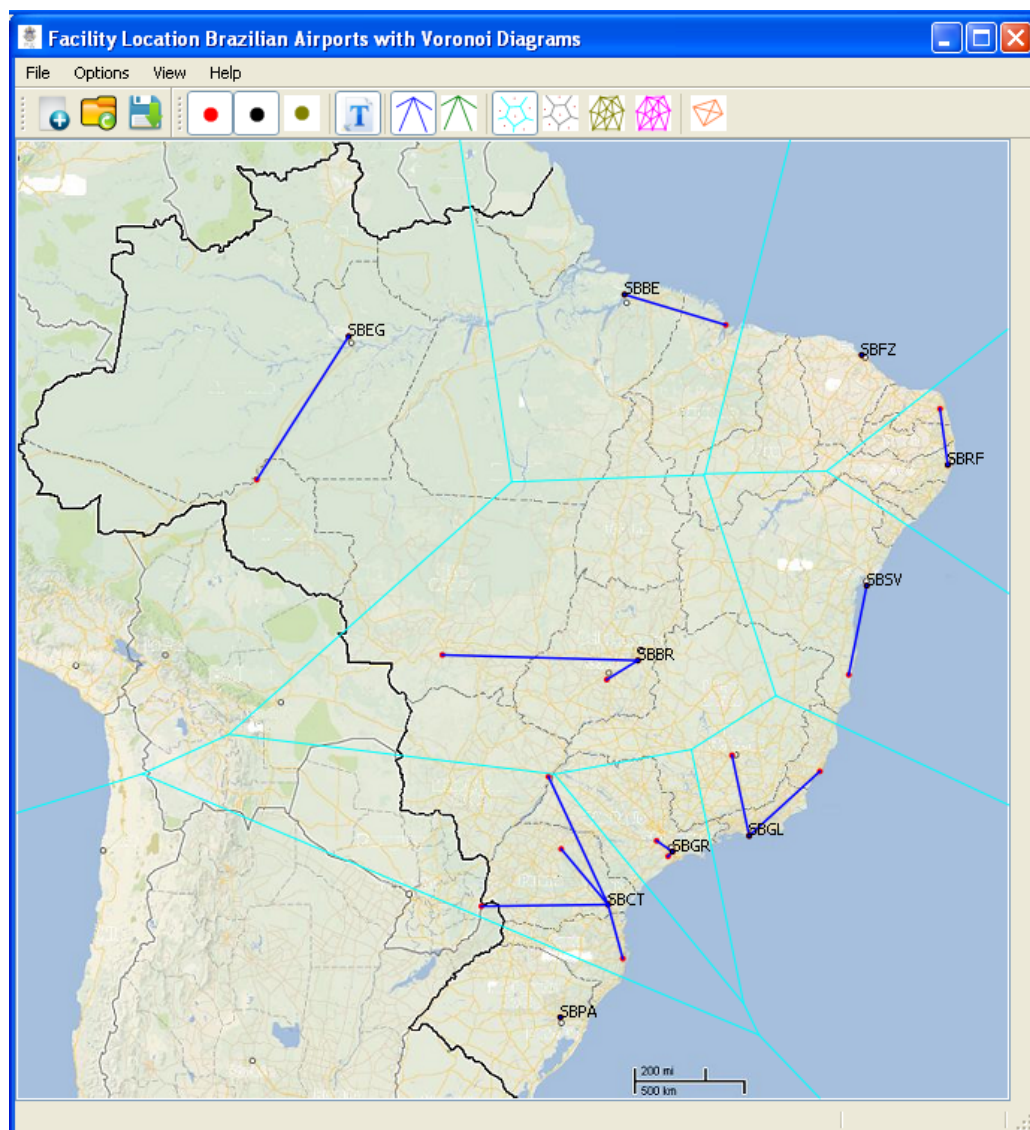


Figura 4.6: Visualização do resultado da primeira fase do método de duas fases com  $n = 24$  e a localização de 10 *hubs* regionais.

Portanto, na comparação do modelo integrado versus o método de duas fases para o problema fundamental de localização de *hubs* no transporte aéreo



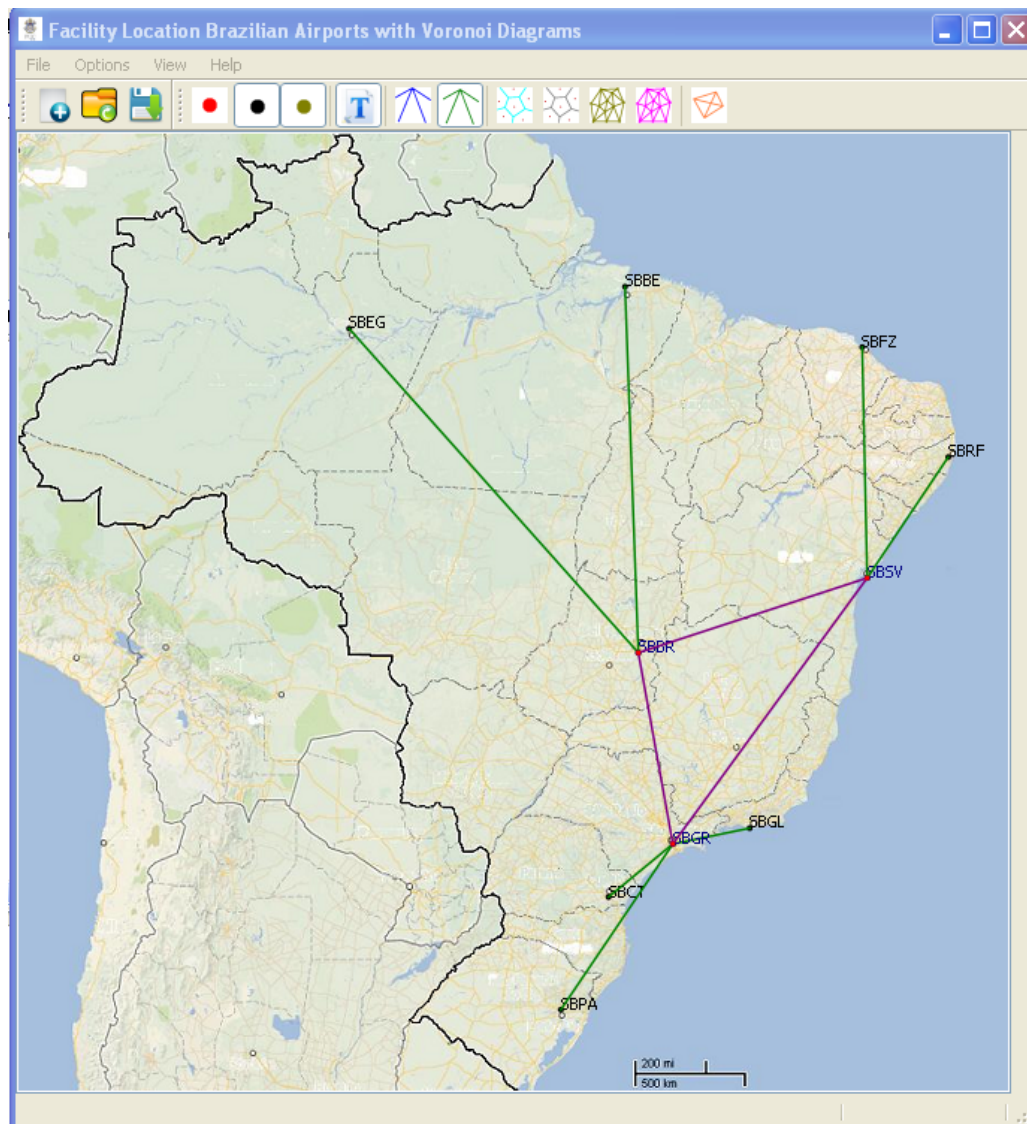


Figura 4.7: Visualização do resultado da segunda fase do método de duas fases com  $n = 24$ , 10 *hubs* regionais e a localização de 3 *hubs* centrais.

brasileiro em voos domésticos no ano de 2010, a diferença entre as duas estratégias propostas está no tempo de solução, observando que o modelo integrado precisou de tempo maior para encontrar o resultado enquanto que o método de duas fases manifestou-se mais rápido. A comparação é apresentada na Tabela 4.12, onde o tempo de solução para resolver o modelo integrado é mostrado junto com o somatório dos tempos para resolver os modelos da fase um e dois do método de duas fases.

A rapidez da estratégia do método de duas fases e a limitação de memória dos computadores torna este método atrativo para um número maior de aeroportos na rede, apesar deste método necessitar da intervenção do usuário para calcular os fluxos não finalizados da rede entre as duas fases.

Todavia, sendo os resultados de ambas estratégias iguais, em relação à

localização de *hubs* centrais e regionais, e alocações de *spokes* aos *hubs*, as estratégias são promissoras.

### 4.3.2

#### Rede Avianca

Este teste computacional tem como objetivo apresentar a localização de *hubs* centrais e regionais para a malha de voos domésticos da companhia Avianca (veja Tabela 2.3) usando a estratégia do método de duas fases.

Para tal, foi considerada uma instância específica que considera apenas os aeroportos atendidos pela companhia concessionária Avianca. Como para o ano de 2010 somente o número de localidades atendidas pela Avianca é conhecido, a informação sobre as localidades atendidas em voos domésticos foi extraída da página *web* da companhia aérea em 2013 (AVIANCA, 2013), registradas na Tabela 4.13. Para os dados de fluxos entre as localidades atendidas pela Avianca, foram tomados os correspondentes fluxos dos voos domésticos informados pela ANAC de 2010.

Para a realização do teste computacional, considerando a instância correspondente a malha da Avianca, os valores dos parâmetros são determinados de maneira similar em relação aos testes computacionais já realizados com a estratégia do método de duas fases. Os resultados foram obtidos fixando-se  $p = 10$  e  $q = 3$ .

Na Figura 4.8, os resultados da primeira fase do método de duas fases são visualizados. A rede de 24 aeroportos é identificada com a cor vermelho, e a localização de 10 *hubs* regionais é identificada com a cor preta. Os segmentos de reta azuis mostram a alocação dos aeroportos aos *hubs* regionais localizados. Finalmente, tomando como sementes os *hubs* regionais, o diagrama de Voronoi mostra as regiões de abrangência de cada *hub* regional em turquesa. A Figura 4.9 mostra os resultados da segunda fase, referentes à rede de 10 *hubs* regionais em cor preta, localizados na fase anterior, e os pontos em mostarda são os *hubs* centrais localizados. Os segmentos de reta verdes mostram a alocação dos aeroportos aos *hubs* centrais localizados. Finalmente, os segmentos de reta em lilás mostram a interconexão entre *hubs* centrais. Pode-se observar que estes resultados são iguais aos resultados encontrados tanto na estratégia do modelo integrado, mostrado na Tabela 4.6, como na estratégia de duas fases mostrado na Tabela 4.10.

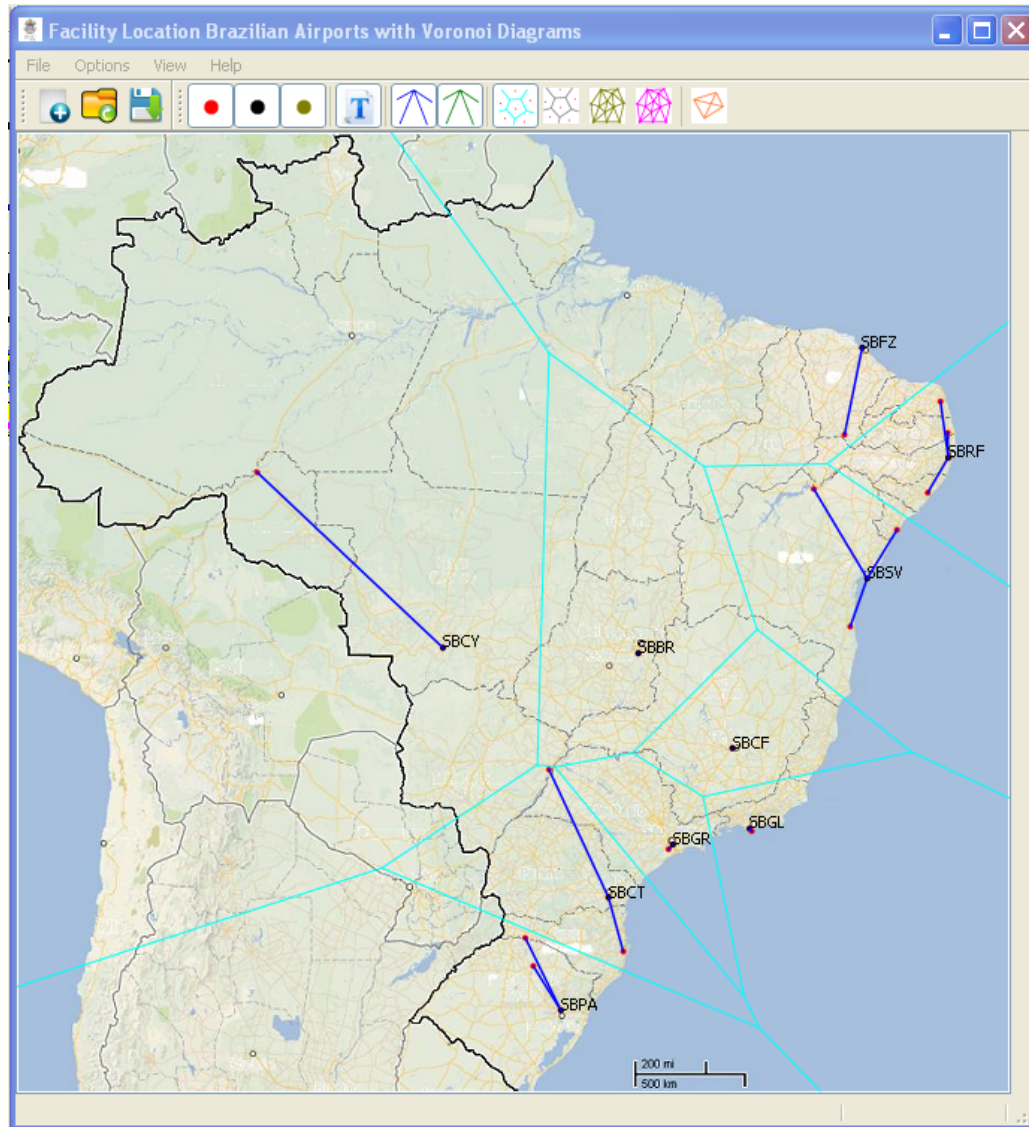


Figura 4.8: Visualização do resultado da primeira fase do método de duas fases para os  $n = 24$  aeroportos atendidos por Avianca e 10 *hubs* regionais.

Tabela 4.7: Localização de *hubs* centrais e suas alocações obtidas com a estratégia do modelo integrado com  $p = 19$  e  $q = 2, \dots, 6$ .

$q$ -hubs	hub central	Município	hub regional
2	SBSV	Salvador - BA	SBPS, SBSV, SBFZ, SBSL, SBBE, SBRF
	SBGR	Guarulhos - SP	SBEG, SBBR, SBVT, SBCF, SBCG, SBCY, SBCT, SBFI, SBGL, SBPV, SBPA, SBFL, SBGR
3	SBSV	Salvador - BA	SBPS, SBSV, SBFZ, SBRF
	SBBR	Brasília - DF	SBEG, SBBR, SBSL, SBCY, SBBE, SBPV
	SBGR	Guarulhos - SP	SBVT, SBCF, SBCG, SBCT, SBFI, SBGL, SBPA, SBFL, SBGR
4	SBSV	Salvador - BA	SBPS, SBSV, SBFZ, SBRF
	SBBR	Brasília - DF	SBEG, SBBR, SBSL, SBCY, SBBE, SBPV
	SBGL	Rio de Janeiro - RJ	SBVT, SBCF, SBGL
	SBGR	São Paulo - SP	SBCG, SBCT, SBFI, SBPA, SBFL, SBSP
5	SBSV	Salvador - BA	SBPS, SBSV
	SBBR	Brasília - DF	SBEG, SBBR, SBSL, SBCY, SBBE, SBPV
	SBRF	Recife -PE	SBFZ, SBRF
	SBGL	Rio de Janeiro - RJ	SBVT, SBCF, SBGL
	SBGR	Guarulhos - SP	SBCG, SBCT, SBFI, SBPA, SBFL, SBSP
6	SBSV	Salvador - BA	SBPS, SBSV
	SBBR	Brasília - DF	SBBR, SBCY, SBPV
	SBBE	Belém - PA	SBEG, SBSL, SBBE
	SBRF	Recife -PE	SBFZ, SBRF
	SBGL	Rio de Janeiro - RJ	SBVT, SBCF, SBGL
	SBGR	Guarulhos - SP	SBCG, SBCT, SBFI, SBPA, SBFL, SBSP

Tabela 4.8: *Hubs* centrais localizados com a estratégia do modelo integrado com  $p = 10$  e  $p = 19$  *hubs* regionais e  $q = 2, \dots, 6$  *hubs* centrais.

$q$ - <i>hubs</i>	<i>hubs</i> centrais	<i>hubs</i> regionais alocados
2	SBSV, SBGR	10, 19
3	SBSV, SBGR, SBBR	10, 19
4	SBSV, SBSP, SBBR, SBGL,	10, 19
5	SBSV, SBSP, SBBR, SBGL, SBRF,	10, 19
6	SBSV, SBSP, SBBR, SBGL, SBRF, SBBE	10, 19

Tabela 4.9: Resultados da estratégia do método de duas fases para  $p = 10, \dots, 40$  *hubs* regionais e  $q = 2, \dots, 6$  *hubs* centrais.

$p$ - <i>hubs</i>	$q$ - <i>hubs</i>	Tempo Solução (s)	Função Objetivo
10		2,45	1,6517e+10
	2	0,27	7,5318e+10
	3	0,25	6,1917e+10
	4	0,26	5,6501e+10
	5	0,27	5,6501e+10
	6	0,27	4,9938e+10
19		2,2	6,1199e+09
	2	7,64	8,6438e+10
	3	7,07	7,3117e+10
	4	7,30	6,7681e+10
	5	8,92	5,4046e+10
	6	6,93	6,0299e+10
24		2,19	4,0264e+09
	2	44,27	8,8952e+10
	3	47,32	7,5216e+10
	4	38,14	6,9749e+10
	5	46,74	6,6114e+10
	6	37,55	6,2368e+10
34		2,11	1,7213e+09
	2	728,20	9,2881e+10
	3	597,16	7,8213e+10
	4	591,36	7,2800e+10
	5	690,766	6,7838e+10
	6	615,66	6,4318e+10
40		2,08	1,069e+09
	2	3906,72	9,4371e+10
	3	3602,48	7,9688e+10
	4	2831,90	7,4173e+10
	5	4099,52	6,8902e+10
	6	2643,56	6,5173e+10



Tabela 4.10: *Hubs* centrais localizados com a estratégia do método de duas fases com  $p = 10, \dots, 40$  *hubs* regionais e  $q = 2, \dots, 6$  *hubs* centrais.

$q$ - <i>hubs</i>	<i>hubs</i> centrais	<i>hubs</i> regionais alocados
2	SBSV, SBGR	10, 19, 24, 34, 40
3	SBSV, SBGR, SBBR	10, 19, 24, 34, 40
4	SBSV, SBBR, SBGL, SBGR SBSV, SBBR, SBGL, SBSP	10, 19, 40 24, 34
5	SBSV, SBBR, SBGL, SBRF, SBGR SBSV, SBBR, SBGL, SBRF, SBSP SBSV, SBBR, SBGL, SBMA, SBSP	10, 19 24 34, 40
6	SBSV, SBBR, SBGL, SBRF, SBGR, SBBE SBSV, SBBR, SBGL, SBRF, SBSP, SBBE SBSV, SBBR, SBGL, SBRF, SBSP, SBMA SBSV, SBBR, SBGL, SBRF, SBSP, SBBE	10, 19 24 34 40

Tabela 4.11: Resultados da segunda fase da estratégia do método de duas fases para  $n = 24$ ,  $p = 10$  e  $q = 2, \dots, 6$  *hubs* centrais.

$q$ - <i>hubs</i>	Tempo Solução (s)	Função Objetivo
2	0,61	4,3687e10
3	0,58	3,5642e10
4	0,63	3,3070e10
5	0,81	3,0827e10
6	0,58	2,8440e10

Tabela 4.12: Comparação do tempo de solução do modelo integrado versus método de duas fases com  $p = 10$  e  $q = 2, \dots, 6$ .

$q$ - <i>hubs</i>	Tempo Solução(s)	
	Modelo integrado	Método duas fases
2	109,63	0,69
3	93,13	0,64
4	103,97	0,71
5	112,77	0,89
6	86,06	0,64

Tabela 4.13: Lista de aeroportos brasileiros atendidos pela empresa Avianca.

Nro. Aeroporto		Município	Nro. Aeroporto		Município
1	SBMO	Maceio - AL	13	SBCT	Curitiba - PR
2	SBIL	Ilheus - BA	14	SBGL	Galeão - RJ
3	SBSV	Salvador - BA	15	SBRJ	Santos Dumont–RJ
4	SBFZ	Fortaleza - CE	16	SBNT	Natal - RN
5	SBJU	Juazeiro do Norte–CE	17	SBPV	Porto Velho - RO
6	SBBR	Brasilia - DF	18	SBPF	Passo Fundo - RS
7	SBCF	Confins - MG	19	SBPA	Porto Alegre - RS
8	SBCG	Campo Grande - MS	20	SBCH	Chapecó - SC
9	SBCY	Cuiabá - MT	21	SBFL	Florianópolis - SC
10	SBJP	João Pessoa - PB	22	SBAR	Aracaju - SE
11	SBPL	Petrolina - PE	23	SBSP	Congonhas - SP
12	SBRF	Recife -PE	24	SBGR	Guarulhos - SP

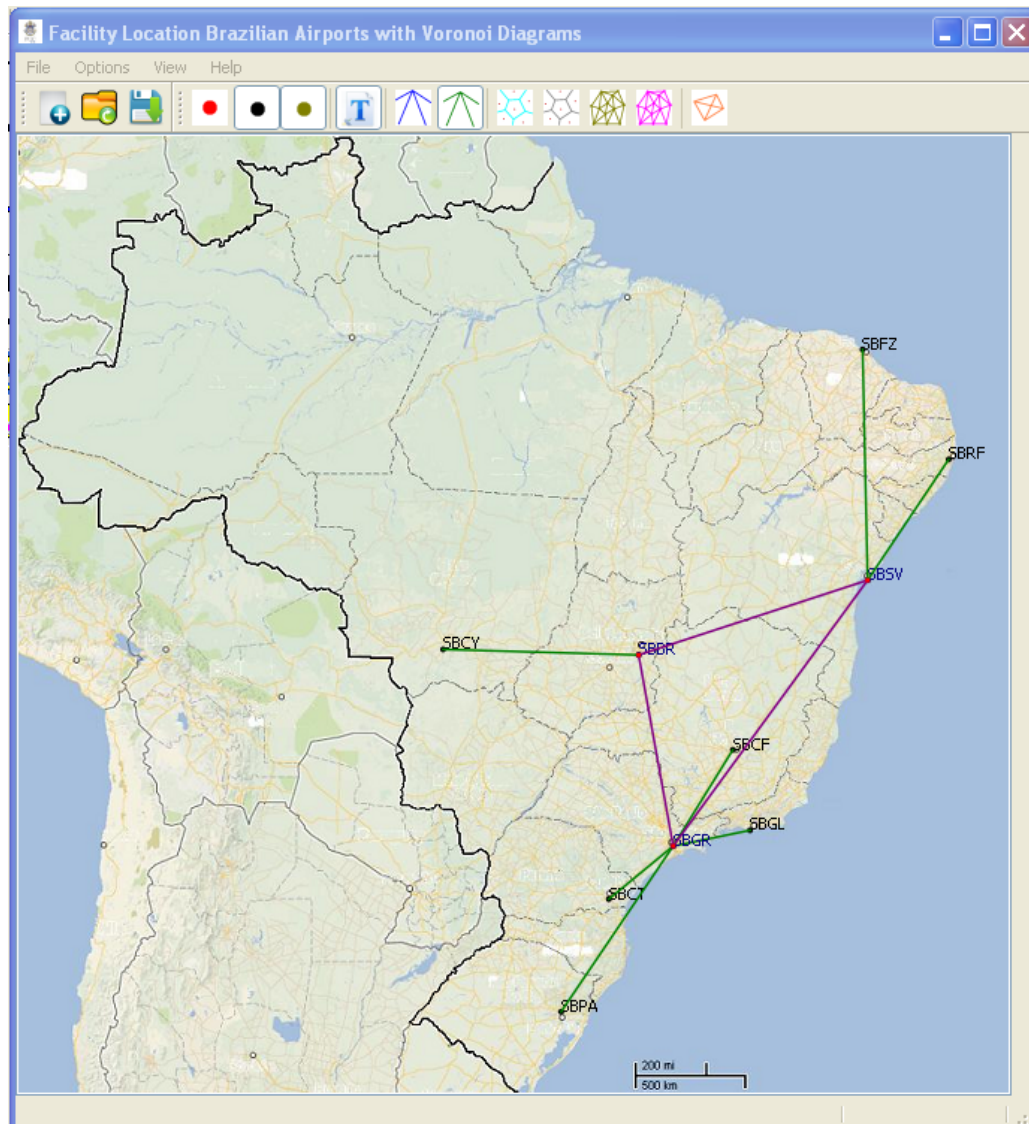


Figura 4.9: Visualização do resultado da segunda fase do método de duas fases para  $n = 24$  aeroportos atendidos por Avianca, 10 *hubs* regionais e 3 *hubs* centrais.

## 5

### Conclusões

Nesta tese, foram propostas duas estratégias para resolver o problema fundamental de *hubs* para o sistema de transporte aéreo brasileiro com a introdução de *hubs* regionais e centrais, via a resolução de um modelo integrado e a aplicação de um método heurístico de duas fases. Experimentos numéricos realizados com as duas estratégias propostas mostraram que elas são equivalentes no que se refere à localização de *hubs* e alocação de *spokes*, sendo, porém, distintas no que se refere ao tempo de solução. Os resultados computacionais mostraram que ambas estratégias propostas são promissoras no sentido de melhorar o sistema de transporte aéreo de um país grande como o Brasil, mediante a identificação de *hubs* regionais e centrais de acordo com o tamanho do fluxo de passageiros nos aeroportos.

Foi introduzida também uma ferramenta de ajuda à tomada de decisões no sistema de transporte aéreo brasileiro em voos domésticos de passageiros e de carga, a fim de revelar a situação atual do sistema de transporte aéreo e propor mudanças no atual panorama. Por exemplo, o aeroporto Deputado Luís Eduardo Magalhães (SBSV) em Salvador - BA tem localização estratégica, mas não possui infraestrutura suficiente de se tornar um *hub* central, já o aeroporto Governador André Franco Montoro (SBGR) em Guarulhos - SP, que trabalha acima da sua capacidade, não tem possibilidade de expansão a curto tempo. Por outro lado, o aeroporto Antônio Carlos Jobim - Galeão (SBGL) no Rio de Janeiro - RJ possui infraestrutura adequada para se comportar como *hub* central, mas atualmente trabalha sem atingir sua capacidade máxima, já que as companhias aéreas preferem, por outros motivos, os aeroportos Governador André Franco Montoro (SBGR) e Congonhas (SBSP) em São Paulo - SP, operando como *hubs* centrais, piorando o funcionamento do sistema de transporte aéreo brasileiro. Observa-se que o aeroporto internacional Deputado Luis Eduardo Magalhães (SBSV) em Salvador - BA possui uma localização geográfica estratégica, além de ser o quinto aeroporto mais movimentado do Brasil, com quase 8 milhões de passageiros, e poderia desempenhar um papel de *hubs* central, junto com o aeroporto internacional Governador André Franco Montoro (SBGR) em Guarulhos - SP, e, se fosse necessário acrescentar

mais aeroportos de grande porte, a terceira opção estratégica seria o aeroporto Presidente Juscelino Kubitschek em Brasília - DF.

Os resultados apresentados verificam a importância da introdução de *hubs*, já que permitem uma maior concentração de passageiros em rotas mais frequentes, diminuindo custos operacionais. Por outro lado, a passagem obrigatória por pelo menos um *hub* resultaria em percursos maiores, o que seria compensado com a redução do custo alcançada com a economia de escala.

Ao comparar as duas estratégias propostas em uma mesma instância, foram localizados *hubs* centrais e regionais idênticos, com diferença somente no tempo de solução. Verificou-se que a estratégia do método de duas fases foi mais rápida, porém esta estratégia precisa um tempo intermédio entre a primeira e segunda fase, a fim de calcular primeiramente os fluxos não finalizados com a informação das localizações dos *hubs* regionais, e depois localizar os *hubs* centrais.

Se comparados o transporte de passageiros com o transporte de carga, revela-se a importância do aeroporto Eduardo Gomes (SBEG) em Manaus - AM como *hub* central, devido à sua localização geográfica favoravelmente central em relação à região amazônica e à importância do transporte aéreo para essa região, em que outros meios de transporte são precários. Por exemplo, se considerados os 114 aeroportos atendidos por alguma companhia aérea no transporte de carga, os aeroportos que desempenhariam um bom papel como *hubs* centrais seriam o aeroporto Eduardo Gomes (SBEG) em Manaus - AM e o aeroporto internacional Governador André Franco Montoro (SBGR) em Guarulhos - SP. Caso fosse necessário introduzir mais um *hub* central, a terceira opção estratégica seria o aeroporto internacional Deputado Luis Eduardo Magalhães (SBSV) em Salvador - BA.

Coincidentemente, os aeroportos indicados para serem *hubs* centrais no sistema aéreo brasileiro pelas duas estratégias propostas foram apontados como sendo futuras sedes para os jogos da Copa do Mundo (2014). Espera-se que os prazos das obras de ampliação da capacidade dos aeroportos sejam cumpridos e que novas medidas sejam tomadas para que o país possa oferecer serviços de transporte aéreo de qualidade no futuro próximo.

Em resumo, nesta tese foi possível

- introduzir um novo modelo integrado que permite a localização simultânea de *hubs* centrais e regionais.
- Desenvolver um software gráfico para visualizar os resultados do problema de localização de *hubs* para o sistema brasileiro de transporte aéreo.

- O software obtém os dados necessários para a resolução dos modelos utilizados, que podem ser visualizados ou exportados em forma de arquivos.
- Pode-se exportar os modelos com os dados correspondentes em formato MPS ou GMLP.
- O software permite a manipulação pelo usuário dos seguintes parâmetros: número de *hubs* regionais, número de *hubs* centrais e o fator  $\alpha$ .
- O software permite a visualização dos dados e dos resultados da primeira e segunda fase do método proposto.
- O software permite a importação de resultados encontrados através de outros métodos de solução.
- O software considera o fluxo real de passageiros na resolução do método de duas fases. Se um fluxo não foi completado no final da primeira fase, ele deve ser considerado na segunda fase. Existe uma preocupação em completar todos os fluxos.
- Devido à limitação de memória, o software limita ao número fixo de *hubs* regionais se o valor de  $\alpha$  for não nulo.

Assim, não só *hubs* são introduzidos com as duas estratégias propostas, como se faz uma categorização dos mesmos em *hubs* regionais, associados a fluxos menos densos de passageiros ou de cargas, e em *hubs* centrais, associados a fluxos mais densos, como a tarefa de resolver um problema difícil, considerando uma rede com um número grande de aeroportos.

Como trabalhos futuros pretende-se introduzir o conceito de confiança de sistemas (*reliable systems*) no sistema de transporte aéreo brasileiro. A idéia é, partindo da inviabilidade de operação de um aeroporto, devido as más condições de tempo, por exemplo, reconfigurar o sistema, oferecendo rotas aéreas alternativas em tempo razoável. Pode-se introduzir na pesquisa alocação múltipla, assim como novos critérios para a localização de *hubs*. Outra linha a seguir é considerar também os vôos internacionais, e assim estudar a capacidade real dos aeroportos, e procurar *hubs* alternativos que possam albergar um maior fluxo de passageiros.

## 6

### Referências Bibliográficas

ABDINNOUR-HELM, S. Using simulated annealing to solve the  $p$ -hub median problem. **International Journal of Physical Distribution and & Logistics Management**, MCB UP Ltd, v. 31, n. 3, p. 203–220, 2001. 3.4.2

ADLER, N.; HASHAI, N. Effect of open skies in the middle east region. **Transportation Research Part A**, v. 39, p. 878–894, 2005. 3.3

ALUMUR, S.; KARA, B. Y. Network hub location problems: The state of the art. **European Journal of Operational Research**, v. 190, n. 1, p. 1–21, 2008. 1, 3.3, 3.4.1

ALZAMORA, G. S.; RAUPP, F. M. P.; PIZZOLATO, N. D. Localização e alocação de centros de saúde: Estudo de caso em Ácora, Puno, Peru. In: **Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO)**. Ubatuba, SP: [s.n.], 2011. 3.2

ALZAMORA, G. S. et al. The air transportation hub-and-spoke design problem: Comparison between a continuous and a discrete solution method. In: **Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO)**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2012. p. 2213–2222. 3.4

AN, Y.; ZHANG, Y.; ZENG, B. The reliable hub-and-spoke design problem: Models and algorithms. **Optimization Online**, 2011. 3.3, 3.3

ANAC. **Anuário do transporte aéreo 2010**. 2011. Internet. Wwww.anac.gov.br. 1, 2.3, 2, 2.2, 2.3, 2.4, 2, 2.4, 2, 2, 2, 2.5, 2, 2, 2.6, 2.7, 2.6, 2.7, 4, 4.1.2, 4.2.1, A.1, A.2

ANAC. **Anuário do transporte aéreo 2011**. 2013. Internet. Wwww.anac.gov.br. 1, 2, 2, 2.5, 2

AURENHAMMER, F. Voronoi diagrams - a survey of a fundamental geometric data structure. **ACM Computing Surveys**, v. 23, p. 345–405, 1991. 4.1.2

AVERSA, R. et al. A mixed integer programming model on the location of a hub port in the east coast of south America. **Maritime Economics & Logistics**, v. 7, p. 1–18, 2005. 3.3

AVIANCA. **www.avianca.com.br**. 2013. Internet. Última visita em agosto 2013. 4.3.2

AYKIN, T. Lagrangian relaxation based approaches to capacitated hub-and-spoke network design problem. **European Journal of Operational Research**, v. 79, n. 3, p. 501–523, 1994. ISSN 0377-2217. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0377221794900620>>. 3.4.1

BARAT, J. **Infraestrutura econômica no Brasil: diagnósticos e perspectivas para 2025**. [S.l.]: IPEA, 2010. 339–400 p. 2

BENDERS, J. F. Partitioning procedures for solving mixed-variables programming problems. **Numerische Mathematik**, v. 4, p. 238–252, 1962. 3.4.1

BOOTS, B.; SOUTH, R. Modeling retail trade areas using higher-order, multiplicatively weighted voronoi diagrams. **Journal of Retailing**, v. 73, p. 519–536, 1997. 4.1.2

BRANDEAU, M. L.; CHIU, S. S. An overview of representative problems in location research. **Management Science**, INFORMS, v. 35, n. 6, p. 645–674, 1989. ISSN 00251909. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/2632113>>. 3.1

CAMPBELL, J. F. Integer programming formulations of discrete hub location problems. **European Journal of Operational Research**, v. 72, p. 387–405, 1994. 1, 3.3, 3.3.2, 4

CAMPBELL, J. F.; ERNST, A.; KRISHNAMOORTHY, M. Hub location problems. In: \_\_\_\_\_. [S.l.]: Springer, 2009. cap. 12, p. 373–407. 3.3

CAMPBELL, J. F.; O'KELLY, M. E. Twenty-five years of hub location research. **Transportation Science**, v. 46, p. 153–169, 2012. 1, 3.3, 3.3

CAPTIVO, E. M. Fast primal and dual heuristics for the  $p$ -median location problem. **European Journal of Operational Research**, v. 52, p. 65–74, 1991. 3.4.2

CHEN, J.-F. A hybrid heuristic for the uncapacitated single allocation hub location problem. **Omega**, v. 35, n. 2, p. 211–220, April 2007. Disponível em: <<http://ideas.repec.org/a/eee/jomega/v35y2007i2p211-220.html>>. 3.4.2

CHOU, C.-C. Application of FMCDM model to selecting the hub location in the marine transportation: A case study in southeastern Asia. **Mathematical and Computer Modelling**, Elsevier Ltd., v. 51, n. 6, p. 791–801, 2010. ISSN 0895-7177. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0895717709003495>>.

3.4.2



CONTRERAS, I.; FERNANDEZ, E. General network design: A unified view of combined location and network design problems. **European Journal of Operational Research**, v. 219, p. 680–697, 2011. 1

CONTRERAS, I.; JEAN-FRANÇOIS; LAPORTE, G. Benders decomposition for large-scale uncapacitated hub location. **Operations Research**, v. 59, n. 6, p. 1477–1490, 2011. 3.4.1

COSTA, T. F. G.; LOHMANN, G.; OLIVEIRA, A. V. M. A model to identify airport hubs and their importance to tourism in Brazil. **Research in Transportation Economics**, p. 3–11, 2010. 1, 4.1.2, 4.2.3

CUNHA, C. B.; SILVA, M. R. A genetic algorithm for the problem of configuring a hub-and-spoke network for a LTL trucking company in Brazil. **European Journal of Operational Research**, v. 179, p. 747–758, 2007. 3.3, 3.4.2

DASKIN, M. S. (Ed.). **Network and Discrete Location: Models, Algorithms, and Applications**. New York: John Wiley and Sons, 1995. (Springer Series in Operations Research). 3.1

DAVARI, S.; ZARANDI, M. H. F.; TURKSEN, I. B. The fuzzy reliable hub location problem. In: **Fuzzy Information Processing Society (NAFIPS), 2010 Annual Meeting of the North American**. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–6. 3.4.2

de Camargo, R. S.; Miranda Jr, G.; LUNA, H. P. Benders decomposition for uncapacitated multiple allocation hub location problem. **Computers & Operations Research**, v. 35, p. 1047–1064, 2008. 3.4.1

DREZNER, Z. (Ed.). **Facility Location: A Survey of Applications and Methods**. New York: Springer Verlag, 1995. (Springer Series in Operations Research). 3.1, 3.3

DREZNER, Z.; HAMACHER, H. W. (Ed.). **Facility Location: Applications and Theory**. New York: Springer, 2004. 3.1, 3.1, 3.3

EISELT, H. A. Locating landfills-optimization vs. reality. **European Journal of Operational Research**, v. 179, p. 1040–1049, 2007. 3.3

ERLENKOTTER, D. A dual-based procedure for uncapacitated facility location. **Operations research**, v. 26, p. 992–1009, 1978. 3.4.2

FARAHANI, R. Z.; HEKMATFAR (Ed.). **Facility Location: Concepts, Models, Algorithms and Case Studies: Contributions to Management Science**. [S.l.]: Physica-Verlag Heidelberg, 2009. 3.1

FARAHANI, R. Z. et al. Hub location problems: A review of models, classification, solution techniques and applications. **Computers & Industrial Engineering**, Elsevier Ltd., v. 64, p. 1096–1109, 2013. 1, 3.3, 3.3, 3.3, 3.4, 3.4.1, 3.1, 3.4.2, 3.6, 3.7

FARAHANI, R. Z.; STEADIESEIFI, M.; ASGARI, N. Multiple criteria facility location problems: A survey. **Applied Mathematical Modelling**, Elsevier Ltd., v. 34, p. 1689–1709, 2010. 3.1

FELDMAN, E.; LEHRER, F. A.; RAY, T. L. Warehouse locations under continuous economies of scale. **Management Science**, v. 12, p. 670–684, 1966. 3.4.2

FIGUEIREDO, R. M. A.; O'KELLY, M. E.; PIZZOLATO, N. D. A two stage hub location model for air transportation on Brazil. Submitted to International Transactions in Operational Research (ITOR). 2012. 1, 3.3, 3.4.2, 4.1.2, 4.2, 4.2.3

GALVÃO, R. D. A dual-bounded algorithm for the  $p$ -median problem. **Operations research**, v. 28, p. 1112–1121, 1980. 3.4.2

GELHAUSEN, M. C.; BERSTEN, P.; WILKEN, D. Do airport capacity constraints have a serious impact on the future development of air traffic? **Journal of Air Transport Management**, Elsevier Ltd., v. 28, p. 3–13, 2013. 1

GLOVER, F. Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. **Computers & Operations Research**, v. 13, p. 533–549, 1986. 3.4.2

HAKIMI, S. L. Optimum locations of switching centers and the absolute centers and medians of a graph. **Operations Research**, v. 12, p. 450–459, 1964. 3.2.1

HEKMATFAR, M.; PISHVAEE, M. Hub location problem. In: \_\_\_\_\_. [S.l.]: Physica-Verlag Heidelberg, 2009. cap. 11, p. 243–270. 3.3, 3.4.1

HOLLAND, J. H. **Adaptation in Natural and Artificial Systems**. John H Holland: University of Michigan Press, 1975. 3.4.2

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. 2013. Internet. [www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br). 2

ICAO. **Annual Report of the Council 2011**. 2012. Doc 9975. 1, 2.1, 2.2, 2, 2.1

INFRAERO. **Movimento Operacional da REDE INFRA-ERO de Janeiro a Dezembro de 2012**. 2012. Internet. [www.infraero.gov.br/images/stories/Estatistica/2012/dez.pdf](http://www.infraero.gov.br/images/stories/Estatistica/2012/dez.pdf). 2, 2

KARA, B. Y.; TANSEL, B. . The latest arrival hub location problem. **Management Science**, INFORMS, v. 47, n. 10, p. 1408–1420, 2001. ISSN 00251909. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/822495>>. 3.3

KARIV, O.; HAKIMI, S. L. An algorithmic approach to network location problems. II: The  $p$ -medians. **SIAM Journal of Applied Mathematics**, Society for Industrial and Applied Mathematics, v. 37, p. 539–560, 1979. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/2100911>>. 3.2.1

KIM, H.; O'KELLY, M. E. Reliable  $p$ -hub location problems in telecommunication networks. **Geographical Analysis**, v. 41, p. 283–306, 2009. 3.4.2

KIRKPATRICK, S.; GELATT, C. D.; VECCHI, M. P. Optimization by simulated annealing. **Science**, v. 220, n. 4598, p. 671–680, 1983. 3.4.2

KLINCEWICZ, J. G. Hub location in backbone / tributary network design: A review. **Location Science**, v. 6, p. 307–335, 1998. 3.3

KLOSE, A.; DREXL, A. Facility location models for distribution system design. **European Journal of Operational Research**, Elsevier Ltd., v. 162, p. 4–29, 2005. 3.1

KRATICA, J. et al. Two genetic algorithms for solving the uncapacitated single allocation  $p$ -hub median problem. **European Journal of Operational Research**, v. 182, n. 1, p. 15–28, October 2007. Disponível em: <<http://ideas.repec.org/a/eee/ejores/v182y2007i1p15-28.html>>. 3.4.2

KUEHN, A. A.; HAMBURGUER, M. J. A heuristic program for locating warehouses. **Management Science**, v. 9, n. 4, p. 643–666, 1963. 3.4.2

LABBE, M.; YAMAN, H.; GOURDIN, E. A branch and cut algorithm for hub location problems with single assignment. **Mathematical Programming: Series A and B**, Springer-Verlag New York, Inc, USA, v. 102, p. 371–405, 2005. 3.4.1

LOBO, D. S. **Dimensionamento e Otimização Locacional de Unidades de Educação Infantil**. Dissertação (D. Sc. Thesis) — PUC-Rio, SC, 2003. 3.2

LOVADINE, D. Análise econométrica estrutural da conduta competitiva: Estudo de caso do transporte aéreo pós-liberalização. **Revista de Literatura dos Transportes**, RELIT, v. 3, n. 1, p. 7–39, 2009. 2

MARANZANA, F. On the location of supply points to minimize transport costs. **Operations Research Quarterly**, v. 13, p. 261–270, 1964. 3.4.2

MARAZZO, M.; SCHERRE, R.; FERNANDES, E. Air transport demand and economic growth in Brazil: A time series analysis. **Transportation Research**, Elsevier Ltd., E, n. 46, p. 261–269, 2010. 1

MARIANOV, V.; SERRA, D. Location models for airline hubs behaving as M/D/c queues. **Computers & Operations Research**, Elsevier Science Ltd., Oxford, UK, UK, v. 30, n. 7, p. 983–1003, jun 2003. ISSN 0305-0548. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/S0305-0548\(02\)00052-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0305-0548(02)00052-7)>. 3.4.2

MARTINS, I.; PIZZOLATO, N. D. Utilização da  $p$ -mediana para simulação de bases táticas de helicópteros policiais. In: **Simpósio de Engenharia de Produção (SIMPEP)**. Bauru: [s.n.], 2004. 3.2

MCKINSEY. **Estudo do Setor de Transporte Aéreo no Brasil**. 2010. 2, 2

MELO, M. T.; NICKEL, S.; GAMA, F. S. da. Facility location and supply chain management - a review. **European Journal of Operational Research**, Elsevier Science Ltd., v. 196, n. 2, p. 401–412, 2009. 3.1

MENEZES, R. **O uso do SIG - Sistema de Informação Geográfico - para o apoio à decisão no planejamento da localização das Escolas Municipais em Guaratiba, Rio de Janeiro**. Dissertação (M.Sc. Thesis) — PUC-Rio, RJ, 2011. 3.2

NICKEL, S.; PUERTO, J. **Location Theory: A Unified Approach**. Germany: Springer, 2005. 3.1

OKABE, A. et al. **Spatial tessellations: Concepts and Applications of Voronoi diagrams**. [S.l.]: John Wiley and Sons, LTD, 2000. 4.1.2

O'KELLY, M. E. A quadratic integer program for the location of interacting hub facilities. **European Journal of Operational Research**, v. 32, n. 3, p. 393–404, 1987. 3.3, 3.3.1

OWEN, S. H.; DASKIN, M. S. Strategic facility location: A review. **European Journal of Operational Research**, Elsevier Science Ltd., v. 111, n. 3, p. 423–447, 1998. 3.1

Oxford Economics. **Economic Benefits from Air Transport in Brazil**. 2011. Brazil country report. [Http://www.benefitsofaviation.aero/Documents/Benefits-of-Aviation-Brazil-2011.pdf](http://www.benefitsofaviation.aero/Documents/Benefits-of-Aviation-Brazil-2011.pdf). 1, 2

PAMUK, F. S.; SEPIL, C. A solution to the hub center problem via a single-relocation algorithm with tabu search. **IIE Transactions**, v. 33, 2001. 3.4.2

PIZZOLATO, N. D. et al. Localização de escolas públicas: Síntese de algumas linhas de experiências. **Pesquisa Operacional**, v. 24, p. 111–131, 2004. 3.2

PIZZOLATO, N. D.; RAUPP, F. M. P.; ALZAMORA, G. S. Revisão de desafios aplicados em localização com base em modelos da  $p$ -mediana e suas variantes. **Pesquisa Operacional para o Desenvolvimento(PODES)**, v. 4, n. 1, p. 13–42, 2012. 3.2, 3.4.1, 3.4.2

RAIS, A.; VIANA, A. Operational research in healthcare: A survey. **International Transactions in Operational Researchs**, v. 18, p. 1–31, 2010. 3.2

REESE, J. Solution methods for the  $p$ -median problem: An annotated bibliography. **Networks**, Wiley Subscription Services, Inc., A Wiley Company, v. 48, n. 3, p. 125–142, 2006. ISSN 1097-0037. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1002/net.20128>>. 3.1, 3.1, 3.2

REVELLE, C. S.; EISELT, H. A. Location analysis: A synthesis and survey. **European Journal of Operational Research**, v. 165, n. 1, p. 1–19, 2005. ISSN 0377-2217. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221704002139>>. 3.1

REVELLE, C. S.; EISELT, H. A.; DASKIN, M. S. A bibliography for some fundamental problem categories in discrete location science. **European Journal of Operational Research**, Elsevier B.V., v. 184, p. 817–848, 2008. 3.1

RODRÍGUEZ-MARTÍN, I.; SALAZAR-GONZÁLEZ, J. J. Solving a capacitated hub location problem. **European Journal of Operational Research**, v. 184, n. 2, p. 468–479, 2008. ISSN 0377-2217. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221706011647>>. 3.4.1

RODRIGUEZ, V.; ALVAREZ, M. J.; BARCOS, L. Hub location under capacity constraints. **Transportation Research Part E: Logistics & Transportation Review**, v. 43, n. 5, p. 495–505, September 2007. Disponível em: <<http://ideas.repec.org/a/eee/transe/v43y2007i5p495-505.html>>. 3.4.2

SAHIN, G.; SÜRAL, H. A review of hierarchical facility location models. **Computers & Operations Research**, Elsevier Science Ltd., Oxford, UK, UK, v. 34, n. 8, p. 2310–2331, 2007. ISSN 0305-0548. 3.1

SALGADO, L. H.; VASSALLO, M. D.; OLIVEIRA, A. V. M. Regulação, políticas setoriais, competitividade e formação de preços: Considerações sobre o transporte aéreo no Brasil. **Journal of Transport Literature**, BPTS - Brazilian Transport Planning Society, v. 4, n. 1, p. 7–48, 2010. 2

SASAKI, M.; SUZUKI, A.; DREZNER, Z. On the selection of hub airports for an airline hub-and-spoke system. **Computers & Operations Research**, v. 26, n. 14, p. 1411–1422, 1999. ISSN 0305-0548. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030505489900043X>>. 3.4.2

SINNOT, R. W. Virtues of the Haversine. **Sky & Telescope**, p. 159, 1984. 4.1.2

SKORIN-KAPOV, D.; SKORIN-KAPOV, J. On tabu search for the location of interacting hub facilities. **European Journal of Operational Research**, v. 73, n. 3, p. 502–509, March 1994. Disponível em: <<http://ideas.repec.org/a/eee/ejores/v73y1994i3p502-509.html>>. 3.4.2

SKORIN-KAPOV, D.; SKORIN-KAPOV, J.; O'KELLY, M. Tight linear programming relaxations of uncapacitated  $p$ -hub median problems. **European Journal of Operational Research**, v. 94, p. 582–593, 1996. 3.3.2

SNYDER, L. V. Facility location under uncertainty: A review. **IIE Transactions**, IIE, v. 38, n. 1, p. 537–554, 2006. ISSN 0740-817X. 3.1

TEITZ, M.; BART, P. Heuristic methods for estimated generalized vertex median of a weighted graph. **Operational Research**, v. 15, p. 955–961, 1968. 3.4.2

TOPCUOGLU, H. et al. Solving the uncapacitated hub location problem using genetic algorithms. **Computers & Operations Research**, Elsevier Science Ltd., Oxford, UK, UK, v. 32, n. 4, p. 967–984, abr. 2005. ISSN 0305-0548. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cor.2003.09.008>>. 3.4.2

WAGNER, B. An exact solution procedure for a cluster hub location problem. **European Journal of Operational Research**, v. 178, n. 2, p. 391–401, 2007. ISSN 0377-2217. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221706001111>>. 3.4.2

WAGNER, B. A note on “location of hubs in a competitive environment”. **European Journal of Operational Research**, v. 184, n. 1, p. 57–62, 2008. ISSN 0377-2217. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037722170601143X>>. 3.4.1

WANKE, P. F. Efficiency of Brazil's airports: Evidences from bootstrapped DEA and FDH estimates. **Journal of Air Transport Management**, Elsevier Ltd., v. 23, p. 47–53, 2012. 1

WEBER, A. **Theory of the Location of Industries**. Chicago: The university of chicago Press, 1929. (Springer Series in Operations Research). Translated by Carl J Friedrich from Weber's 1909 book. 3.1, 3.1

WOLSEY, L. A. (Ed.). **Integer Programming**. New York: John Wiley & Sons Inc, 1998. 3.4.1

YAMAN, H. Star  $p$ -hub median problem with modular arc capacities. **Computers & Operations Research**, v. 35, n. 9, p. 3009–3019, 2008. ISSN 0305-0548. Part Special Issue: Bio-inspired Methods in Combinatorial Optimization. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054807000184>>. 3.4.3

## **A**

### **Dados aéreos**

Neste apêndice, são listados todos os aeroportos que foram usados na instância base testada pelas estratégias propostas. Na Tabela A.1 são apresentados o código ICAO, o município, o código de Unidade Federativa, o nome do aeroporto e as coordenadas geográficas (latitude e longitude) dos aeroportos que forneceram transporte de passageiros no ano de 2010. Da mesma forma, a Tabela A.2 apresenta estes dados para os aeroportos que forneceram transporte de carga no ano de 2010. Em seguida, são apresentadas as Tabelas A.3, A.4, A.5, A.6, A.7, A.8, A.9, A.10, A.11 e A.12, mencionadas no Capítulo 4.



Tabela A.1: Lista de aeroportos e aeródromos atendidos pelo transporte aéreo brasileiro em voos domésticos de passageiros no ano 2010. Fonte: ANAC (ANAC, 2011).

Nro.	ICAO	Nome	Município	UF	Latitude	Longitude
1	SBCZ	Cruzeiro Do Sul	Cruzeiro Do Sul	AC	-7,5994	-72,7694
2	SBRB	Plácido De Castro - Presidente Medici	Sena Madureira	AC	-9,8688	-67,8981
3	SBMO	Zumbi Dos Palmares	Rio Largo	AL	-9,5172	-35,7836
4	SWBC	Barcelos	Barcelos	AM	-0,9815	-62,922
5	SWNK	Novo Campo	Boca Do Acre	AM	-8,8336	-67,3122
6	SWBR	Borba	Borba	AM	-4,4086	-59,5978
7	SWCA	Carauari	Carauari	AM	-4,8786	-66,8956
8	SWKO	Coari	Coari	AM	-4,1339	-63,1311
9	SWEI	Eirunepé	Eirunepé	AM	-6,6375	-69,8831
10	SWOB	Fonte Boa	Fonte Boa	AM	-2,5336	-66,0672
11	SWHT	Francisco Correa Da Cruz	Humaitá	AM	-7,5336	-63,0506
12	SWLB	Lábrea	Lábrea	AM	-7,2503	-64,7839
13	SBEG	Eduardo Gomes	Manaus	AM	-3,0411	-60,0506
14	SBMV	Manicoré	Manicoré	AM	-5,8169	-61,2839
15	SWMW	Maués	Maués	AM	-3,3569	-57,7122
16	SWPI	Regional Júlio Belem	Parintins	AM	-2,6694	-56,7711
17	SWTP	Tapuruquara	Santa Isabel Do Rio Negro	AM	-0,4169	-65,0339
18	SBUA	São Gabriel Da Cachoeira	São Gabriel Da Cachoeira	AM	-0,1481	-66,9858

19	SDCG	Senadora Eunice Michiles	São Paulo De Olivença	AM	-3,4694	-68,9583
20	SBTT	Tabatinga	Tabatinga	AM	-4,2505	-69,9377
21	SBTF	Tefé	Tefé	AM	-3,3803	-64,7253
22	SBMQ	Macapá	Macapá	AP	0,0508	-51,0703
23	SBAM	Amapá	Amapá	AP	2,0728	-50,8625
24	SNBR	Barreiras	Barreiras	BA	-12,0792	-45,0094
25	SBLP	Bom Jesus Da Lapa	Bom Jesus Da Lapa	BA	-13,2614	-43,4075
26	SNGI	Guanambi	Guanambi	BA	-14,2069	-42,7511
27	SBIL	Jorge Amado	Ilhéus	BA	-14,815	-39,0333
28	SBLE	Horácio De Mattos - Chapada Diamantina	Lençóis	BA	-12,4833	-41,2731
29	SBUF	Paulo Afonso	Paulo Afonso	BA	-9,4022	-38,2542
30	SBPS	Porto Seguro	Porto Seguro	BA	-16,4381	-39,0778
31	SBSV	Deputado Luís Eduardo Magalhães	Salvador	BA	-12,9086	-38,3225
32	SBTC	Hotel Transamérica	Una	BA	-15,3533	-38,9972
33	SBQV	Vitória Da Conquista	Vitória Da Conquista	BA	-14,8636	-40,8631
34	SBFZ	Pinto Martins	Fortaleza	CE	-3,7758	-38,5322
35	SBJU	Orlando Bezerra De Menezes	Juazeiro Do Norte	CE	-7,2183	-39,2717
36	SBBR	Presidente Juscelino Kubitschek	Brasília	DF	-15,8692	-47,9208
37	SBVT	Eurico De Aguiar Salles - Goiabeiras	Vitória	ES	-20,2581	-40,2864
38	SWNS	Anápolis	Anápolis	GO	-16,3625	-48,9281
39	SBCN	Nelson Rodrigues Guimarães	Caldas Novas	GO	-17,7247	-48,61
40	SBGO	Santa Genoveva	Goiânia	GO	-16,6297	-49,2267
41	SBMC	Minaçu	Minaçu	GO	-13,5506	-48,2006

42	SWLC	General Leite De Castro	Rio Verde	GO	-17,8347	-50,9561
43	SBIZ	Prefeito Renato Moreira	Imperatriz	MA	-5,5306	-47,4583
44	SBSL	Marechal Cunha Machado	São Luis	MA	-2,5869	-44,2361
45	SBAX	Romeu Zema	Araxá	MG	-19,5606	-46,9656
46	SBBQ	Major Brigadeiro Do Ar Doorgal Gomes	Barbacena	MG	-21,2672	-43,7606
47	SBCF	Tancredo Neves	Confins	MG	-19,6244	-43,9719
48	SBBH	Pampulha - Carlos Drummond De Andrade	Belo Horizonte	MG	-19,8519	-43,9506
49	SNDT	Diamantina	Diamantina	MG	-18,2333	-43,6511
50	SBGV	Coronel Altino Machado	Governador Vadarales	MG	-18,8969	-41,9861
51	SBIP	Usiminas	Santana Do Paraíso	MG	-19,4706	-42,488
52	SNYB	Tito Teixeira	Ituiutaba	MG	-19,0019	-49,4872
53	SNAP	Janaúba	Janaúba	MG	-15,7331	-43,3239
54	SBJF	Francisco Alvaro De Assis	Juiz De Fora	MG	-21,7931	-43,3856
55	SBMK	Mário Ribeiro	Montes Claros	MG	-16,7061	-43,8219
56	SNPD	Patos De Minas	Patos De Minas	MG	-18,6722	-46,4914
57	SNJR	São João Del Rei	São João Del Rei	MG	-21,0864	-44,2264
58	SNPY	São Sebastião Do Paraíso	São Sebastião Do Paraíso	MG	-20,9492	-46,9842
59	SBUR	Uberaba - Mário De Almeida Franco	Uberaba	MG	-19,7647	-47,9661
60	SBUL	Tenente-Coronel Aviador César Bombonato	Uberlândia	MG	-18,8836	-48,2253
61	SBVG	Major Brigadeiro Trompowsky	Varginha	MG	-21,5925	-45,4744
62	SBDB	Bonito	Bonito	MS	-21,2294	-56,4561
63	SBCG	Campo Grande	Campo Grande	MS	-20,4694	-51,6703
64	SBCR	Corumbá	Corumbá	MS	-19,0119	-57,6714

65	SBDO	Francisco De Matos Pereira	Dourados	MS	-22,1992	-54,9081
66	SBAT	Piloto Oswaldo Marques Dias	Alta Floresta	MT	-9,8664	-56,105
67	SWRP	Aripuanã	Aripuanã	MT	-10,2531	-59,3892
68	SJHG	Confresa	Confresa	MT	-10,6336	-51,5672
69	SBCY	Marechal Rondon	Várzea Grande	MT	-15,65	-56,1175
70	SIZX	Inácio Luiz Do Nascimento - Juara Sul	Juara	MT	-11,2867	-57,5389
71	SWJN	Juína	Juína	MT	-11,4194	-58,7017
72	SWRD	Rondonópolis	Rondonópolis	MT	-16,5853	-54,7242
73	SWFX	São Felix Do Araguaia	São Félix Do Araguaia	MT	-11,6319	-50,6883
74	SWSI	Presidente João Batista Figueiredo	Sinop	MT	-11,885	-55,5851
75	SBMD	Monte Dourado	Almeirim	PA	-0,8897	-52,6022
76	SBHT	Altamira	Altamira	PA	-3,2508	-52,2522
77	SBBE	Val De Cans -Júlio Cezar	Belém	PA	-1,3847	-48,4789
78	SBAA	Conceição Do Araguaia	Conceição Do Araguaia	PA	-8,3486	-49,3031
79	SBIH	Itaituba	Itaituba	PA	-4,2422	-56,0008
80	SBMA	João Correa Da Rocha	Marabá	PA	-5,3678	-49,1383
81	SBTB	Porto Trombetas	Oriximiná	PA	-1,4844	-56,3992
82	SDOW	Ourilândia Do Norte	Ourilândia Do Norte	PA	-6,7758	-51,06
83	SBCJ	Carajas	Parauapebas	PA	-6,1153	-50,0014
84	SNDC	Redenção	Redenção	PA	-8,0306	-49,9806
85	SNKE	Santana Do Araguaia	Santana Do Araguaia	PA	-9,3353	-50,3503
86	SBSN	Maestro Wilson Fonseca	Santarém	PA	-2,4247	-54,7858
87	SNFX	São Félix Do Xingu	São Félix Do Xingu	PA	-6,6333	-51,9834

88	SBTU	Tucuruí	Tucuruí	PA	-3,7769	-49,7197
89	SBKG	Presidente João Suassuna	Campina Grande	PB	-7,2692	-35,895
90	SBJP	Presidente Castro Pinto	Bayeux	PB	-7,1458	-34,9486
91	SNRU	Oscar Laranjeiras	Carauari	PE	-8,2844	-36,0108
92	SBFN	Fernando De Noronha	Fernando De Noronha	PE	-3,8547	-32,4283
93	SBPL	Senador Nilo Coelho	Petrolina	PE	-9,3675	-40,5636
94	SBRF	Guarapes - Gilberto Freyre	Recife	PE	-8,1264	-34,9228
95	SBTE	Senador Petrólio Portella	Teresina	PI	-5,0606	-42,8244
96	SBCA	Adalberto Mendes Da Silva	Cascavel	PR	-25,0022	-53,5019
97	SBC T	São José Dos Pinhais, Alfonso Pena	Curitiba	PR	-25,5358	-49,1714
98	SBFI	Cataratas (De Iguacu)	Foz De Iguacu	PR	-25,6003	-54,485
99	SBGU	Tancredo Thomas De Faria	Guarapuava	PR	-25,3881	-51,5217
100	SBLO	Governador José Richa	Londrina	PR	-23,3303	-51,1367
101	SBMG	Maringá - Silvio Name Junior	Maringá	PR	-23,4794	-52,0122
102	SDAG	Angra Dos Reis	Angra Dos Reis	RJ	-22,9753	-44,3072
103	SBBZ	Umberto Modiano	Arnação De Búzios	RJ	-22,7661	-41,9655
104	SBCB	Cabo Frio	Cabo Frio	RJ	-22,9208	-42,0714
105	SBCP	Bartolomeu Lisandro	Campos Dos Goytacazes	RJ	-21,6984	-41,3019
106	SBME	Macaé	Macaé	RJ	-22,3458	-41,7639
107	S DTK	Parati	Rio De Janeiro	RJ	-23,2244	-44,7203
108	SBGL	Antônio Carlos Jobim - Galeão	Rio De Janeiro	RJ	-22,81	-43,2506
109	SBJR	Jacarepaguá	Rio De Janeiro	RJ	-22,9869	-43,371
110	SBRJ	Santos Dumont	Rio De Janeiro	RJ	-22,9103	-43,1628

111	SBMS	Dix-Sept Rosado	Mossoró	RN	-5,1958	-37,3617
112	SBNT	Augusto Severo	Parnamirim	RN	-5,9083	-35,2492
113	SBJI	Ji-Paraná	Ji-Paraná	RO	-10,8706	-61,8467
114	SBPV	Governador Jorge Teixeira De Oliveira	Porto Velho	RO	-8,7136	-63,9028
115	SBVH	Brigadeiro Camarão	Vilhena	RO	-12,6942	-60,0972
116	SBBV	Atlas Brasil Cantanhede	Boa Vista	RR	2,8414	-60,6922
117	SBCX	Regional Hugo Cantergiani	Caxias Do Sul	RS	-29,1956	-51,1898
118	SSEER	Erechim	Erechim	RS	-27,66	-52,2761
119	SSLJ	Aeroporto De Ijuí	Ijuí	RS	-28,37	-53,8455
120	SBPF	Lauro Kurtz	Passo Fundo	RS	-28,2453	-52,3286
121	SBPK	Pelotas	Pelotas	RS	-31,7161	-52,3311
122	SBPA	Salgado Filho	Porto Alegre	RS	-29,9939	-51,1711
123	SJRG	Rio Grande	Rio Grande	RS	-32,0817	-52,1633
124	SBSM	Santa Maria	Santa Maria	RS	-29,7108	-53,6922
125	SSZR	Santa Rosa	Santa Rosa	RS	-27,9089	-54,5222
126	SBNM	Santo Ângelo	Santo Ângelo	RS	-28,2822	-54,1689
127	SBUG	Internacional Rubem Berta	Uruguaiana	RS	-29,7819	-57,0383
128	SBCD	Carlos Alberto Da Costa Neves	Caçador	SC	-26,7897	-50,9397
129	SBCH	Serafin Enoss Bertaso	Chapecó	SC	-27,1339	-52,6619
130	SBCM	Diomício Freitas	Forquilha	SC	-28,7244	-49,4214
131	SBFL	Hercílio Luz	Florianópolis	SC	-27,6703	-48,5525
132	SSJA	Santa Terezinha	Joaçaba	SC	-27,1728	-51,5517
133	SBJV	Lauro Carneiro De Loyola	Joinville	SC	-26,2231	-48,7975

134	SBNF	Ministro Victor Konder	Navegantes	SC	-26,8786	-48,6508
135	SBAR	Santa Maria	Aracaju	SE	-10,9853	-37,0733
136	SBAU	Estadual Dario Guarita	Araçatuba	SP	-21,1442	-50,4264
137	SBBT	Chafei Amsei	Barretos	SP	-20,5856	-48,5958
138	SBAE	Bauru - Arealva	Arealva	SP	-22,1578	-49,0683
139	SBKP	Viracopos	Campinas	SP	-23,0069	-47,1344
140	SBML	Frank Milove Milenkovich	Marília	SP	-22,1956	-49,9269
141	SBDN	Presidente Prudente	Presidente Prudente	SP	-22,1783	-51,4189
142	SBRP	Leite Lopes	Ribeirão Preto	SP	-21,1364	-47,7767
143	SDSC	Mário Pereira Lopes	São Carlos	SP	-21,8764	-47,9033
144	SBSR	Professor Eriberto Manoel Reino	São José Do Rio Preto	SP	-20,8161	-49,4047
145	SBSJ	Professor Urbano Ernesto Stumpf	São José Dos Campos	SP	-23,2268	-45,8619
146	SBSP	Congonhas	São Paulo	SP	-23,6261	-46,6539
147	SBGR	Governador André Franco Montoro	Guarulhos	SP	-23,4356	-46,4731
148	SWG N	Araguaína	Araguaína	TO	-7,2283	-48,2408
149	SWG I	Gurupi	Gurupi	TO	-11,7392	-49,1322
150	SBPJ	Brigadeiro Lysias Rodrigues	Palmas	TO	-10,29	-48,3578

Tabela A.2: Lista dos 114 aeroportos e aeródromos atendidos pelo transporte aéreo brasileiro em voos domésticos de carga no ano 2010. Fonte: ANAC (ANAC, 2011).

Nro.	ICAO	Nome	Município	Latitude	Longitude
1	SBCZ	Cruzeiro Do Sul	Cruzeiro Do Sul	AC	-7,5994 -72,7694
2	SBRB	Plácido De Castro - Presidente Medici	Sena Madureira	AC	-9,8688 -67,8981
3	SBMO	Zumbi Dos Palmares	Rio Largo	AL	-9,5172 -35,7836
4	SWBC	Barcelos	Barcelos	AM	-0,9815 -62,922
5	SWKO	Coari	Coari	AM	-4,1339 -63,1311
6	SWEI	Eirunepé	Eirunepé	AM	-6,6375 -69,8831
7	SWOB	Fonte Boa	Fonte Boa	AM	-2,5336 -66,0672
8	SWHT	Francisco Correa Da Cruz	Humaitá	AM	-7,5336 -63,0506
9	SWLB	Lábrea	Lábrea	AM	-7,2503 -64,7839
10	SBEG	Eduardo Gomes	Manaus	AM	-3,0411 -60,0506
11	SWPI	Regional Júlio Belem	Parintins	AM	-2,6694 -56,7711
12	SWTP	Tapuruquara	Santa Isabel Do Rio Negro	AM	-0,4169 -65,0339
13	SBUA	São Gabriel Da Cachoeira	São Gabriel Da Cachoeira	AM	-0,1481 -66,9858
14	SDCG	Senadora Eunice Michiles	São Paulo De Olivença	AM	-3,4694 -68,9583
15	SBTT	Tabatinga	Tabatinga	AM	-4,2505 -69,9377
16	SBTF	Tefé	Tefé	AM	-3,3803 -64,7253
17	SBMQ	Macapá	Macapá	AP	0,0508 -51,0703
18	SNBR	Barreiras	Barreiras	BA	-12,0792 -45,0094



19	SBLP	Bom Jesus Da Lapa	Bom Jesus Da Lapa	BA	-13,2614	-43,4075
20	SNGI	Guanambi	Guanambi	BA	-14,2069	-42,7511
21	SBIL	Jorge Amado	Ilhéus	BA	-14,815	-39,0333
22	SBLE	Horácio De Mattos - Chapada Diamantina	Lençóis	BA	-12,4833	-41,2731
23	SBPS	Porto Seguro	Porto Seguro	BA	-16,4381	-39,0778
24	SBSV	Deputado Luís Eduardo Magalhães	Salvador	BA	-12,9086	-38,3225
25	SBTC	Hotel Transamérica	Una	BA	-15,3533	-38,9972
26	SBQV	Vitória Da Conquista	Vitória Da Conquista	BA	-14,8636	-40,8631
27	SBFZ	Pinto Martins	Fortaleza	CE	-3,7758	-38,5322
28	SBJU	Orlando Bezerra De Menezes	Juazeiro Do Norte	CE	-7,2183	-39,2717
29	SBBR	Presidente Juscelino Kubtschek	Brasília	DF	-15,8692	-47,9208
30	SBVT	Eurico De Aguiar Salles - Goiabeiras	Vitória	ES	-20,2581	-40,2864
31	SBGO	Santa Genoveva	Goiânia	GO	-16,6297	-49,2267
32	S BMC	Minaçu	Minaçu	GO	-13,5506	-48,2006
33	SWLC	General Leite De Castro	Rio Verde	GO	-17,8347	-50,9561
34	SBIZ	Prefeito Renato Moreira	Imperatriz	MA	-5,5306	-47,4583
35	SBSL	Marechal Cunha Machado	São Luis	MA	-2,5869	-44,2361
36	SBAX	Romeu Zema	Araxá	MG	-19,5606	-46,9656
37	SBCF	Tancredo Neves	Confins	MG	-19,6244	-43,9719
38	SBBH	Pampulha - Carlos Drummond De Andrade	Belo Horizonte	MG	-19,8519	-43,9506
39	SNDT	Diamantina	Diamantina	MG	-18,2333	-43,6511
40	SBGV	Coronel Altino Machado	Governador Vadarales	MG	-18,8969	-41,9861
41	SBIP	Usiminas	Santana Do Paraíso	MG	-19,4706	-42,488

42	SBJF	Francisco Alvaro De Assis	Juiz De Fora	MG	-21,7931	-43,3856
43	SBMK	Mário Ribeiro	Montes Claros	MG	-16,7061	-43,8219
44	SNPD	Patos De Minas	Patos De Minas	MG	-18,6722	-46,4914
45	SNJR	São João Del Rei	São João Del Rei	MG	-21,0864	-44,2264
46	SBUR	Uberaba - Mário De Almeida Franco	Uberaba	MG	-19,7647	-47,9661
47	SBUL	Tenente-Coronel Aviador César Bombonato	Uberlândia	MG	-18,8836	-48,2253
48	SBDB	Bonito	Bonito	MS	-21,2294	-56,4561
49	SBCG	Campo Grande	Campo Grande	MS	-20,4694	-51,6703
50	SBCR	Corumbá	Corumbá	MS	-19,0119	-57,6714
51	SBDO	Francisco De Matos Pereira	Dourados	MS	-22,1992	-54,9081
52	SBAT	Piloto Oswaldo Marques Dias	Alta Floresta	MT	-9,8664	-56,105
53	SWRP	Aripuanã	Aripuanã	MT	-10,2531	-59,3892
54	SJHG	Confresa	Confresa	MT	-10,6336	-51,5672
55	SBCY	Marechal Rondon	Várzea Grande	MT	-15,65	-56,1175
56	SWJN	Juína	Juína	MT	-11,4194	-58,7017
57	SWRD	Rondonópolis	Rondonópolis	MT	-16,5853	-54,7242
58	SWFX	São Felix Do Araguaia	São Félix Do Araguaia	MT	-11,6319	-50,6883
59	SWSI	Presidente João Batista Figueiredo	Sinop	MT	-11,885	-55,5851
60	SBMD	Monte Dourado	Almeirim	PA	-0,8897	-52,6022
61	SBHT	Altamira	Altamira	PA	-3,2508	-52,2522
62	SBBE	Val De Cans -Júlio Cezar	Belém	PA	-1,3847	-48,4789
63	SBAA	Conceição Do Araguaia	Conceição Do Araguaia	PA	-8,3486	-49,3031
64	SBIH	Itaituba	Itaituba	PA	-4,2422	-56,0008

65	SBMA	João Correa Da Rocha	Marabá	PA	-5,3678	-49,1383
66	SBTB	Porto Trombetas	Oriximiná	PA	-1,4844	-56,3992
67	SDOW	Ourilândia Do Norte	Ourilândia Do Norte	PA	-6,7758	-51,06
68	SBCJ	Carajas	Parauapebas	PA	-6,1153	-50,0014
69	SNDC	Redenção	Redenção	PA	-8,0306	-49,9806
70	SNKE	Santana Do Araguaia	Santana Do Araguaia	PA	-9,3353	-50,3503
71	SBSN	Maestro Wilson Fonseca	Santarém	PA	-2,4247	-54,7858
72	SNFX	São Félix Do Xingu	São Félix Do Xingu	PA	-6,6333	-51,9834
73	SBTU	Tucuruí	Tucuruí	PA	-3,7769	-49,7197
74	SBKG	Presidente João Suassuna	Campina Grande	PB	-7,2692	-35,895
75	SBJP	Presidente Castro Pinto	Bayeux	PB	-7,1458	-34,9486
76	SBFN	Fernando De Noronha	Fernando De Noronha	PE	-3,8547	-32,4283
77	SBPL	Senador Nilo Coelho	Petrolina	PE	-9,3675	-40,5636
78	SBRF	Guararapes - Gilberto Freyre	Recife	PE	-8,1264	-34,9228
79	SBTE	Senador Petrólio Portella	Teresina	PI	-5,0606	-42,8244
80	SBCA	Adalberto Mendes Da Silva	Cascavel	PR	-25,0022	-53,5019
81	SBCT	São José Dos Pinhais, Alfonso Pena	Curitiba	PR	-25,5358	-49,1714
82	SBFI	Cataratas (De Iguacu)	Foz De Iguacu	PR	-25,6003	-54,485
83	SBLO	Governador José Richa	Londrina	PR	-23,3303	-51,1367
84	SBMG	Maringá - Silvio Name Junior	Maringá	PR	-23,4794	-52,0122
85	SBCB	Cabo Frio	Cabo Frio	RJ	-22,9208	-42,0714
86	SBGL	Antônio Carlos Jobim - Galeão	Rio De Janeiro	RJ	-22,81	-43,2506
87	SBRJ	Santos Dumont	Rio De Janeiro	RJ	-22,9103	-43,1628

88	SBNT	Augusto Severo	Parnamirim	RN	-5,9083	-35,2492
89	SBJI	Ji-Paraná	Ji-Paraná	RO	-10,8706	-61,8467
90	SBPV	Governador Jorge Teixeira De Oliveira	Porto Velho	RO	-8,7136	-63,9028
91	SBVH	Brigadeiro Camarão	Vilhena	RO	-12,6942	-60,0972
92	SBBV	Atlas Brasil Cantanhede	Boa Vista	RR	2,8414	-60,6922
93	SBCX	Regional Hugo Cantergiani	Caxias Do Sul	RS	-29,1956	-51,1898
94	SBPF	Lauro Kurtz	Passo Fundo	RS	-28,2453	-52,3286
95	SBPA	Salgado Filho	Porto Alegre	RS	-29,9939	-51,1711
96	SBCH	Serafin Enoss Bertaso	Chapecó	SC	-27,1339	-52,6619
97	SBCM	Diomício Freitas	Forquilha	SC	-28,7244	-49,4214
98	SBFL	Hercílio Luz	Florianópolis	SC	-27,6703	-48,5525
99	SBJV	Lauro Carneiro De Loyola	Joinville	SC	-26,2231	-48,7975
100	SBNF	Ministro Victor Konder	Navegantes	SC	-26,8786	-48,6508
101	SBAR	Santa Maria	Aracaju	SE	-10,9853	-37,0733
102	SBAU	Estadual Dario Guarita	Araçatuba	SP	-21,1442	-50,4264
103	SBAE	Bauru - Arealva	Arealva	SP	-22,1578	-49,0683
104	SBKP	Viracopos	Campinas	SP	-23,0069	-47,1344
105	SBML	Frank Milove Milenkovich	Marília	SP	-22,1956	-49,9269
106	SBDN	Presidente Prudente	Presidente Prudente	SP	-22,1783	-51,4189
107	SBRP	Leite Lopes	Ribeirão Preto	SP	-21,1364	-47,7767
108	SBSR	Professor Eriberto Manoel Reino	São José Do Rio Preto	SP	-20,8161	-49,4047
109	SBSJ	Professor Urbano Ernesto Stumpf	São José Dos Campos	SP	-23,2268	-45,8619
110	SBSP	Congonhas	São Paulo	SP	-23,6261	-46,6539

111	SBGR	Governador André Franco Montoro	Guarulhos	SP	-23,4356	-46,4731
112	SWG N	Araguaína	Araguaína	TO	-7,2283	-48,2408
113	SWG I	Gurupi	Gurupi	TO	-11,7392	-49,1322
114	SBPJ	Brigadeiro Lysias Rodrigues	Palmas	TO	-10,29	-48,3578

Tabela A.3: Localização de *hubs* regionais e suas alocações obtidas com a primeira fase da estratégia do método de duas fases com  $n = 150$  aeroportos e  $p = 10$  *hubs* regionais.

Nro.	Aeroporto	<i>spokes</i>
1	SBEG	SBCZ, SBRB, SWBC, SWNK, SWBR, SWCA, SWKO, SWEI, SWOB, SWHT, SWLB, SBEG, SBMY, SWMW, SWPI, SWTP, SBUA, SDCG, SBTT, SBTF, SBAT, SWRP, SIZX, SWJN, SBIH, SBTB, SBSN, SBJI, SBPV, SBVH, SBBV
2	SBSV	SBLP, SNGI, SBIL, SBLE, SBUF, SBPS, SBSV, SBTC, SBQV, SBPL, SBAR
3	SBFZ	SBFZ, SBJU, SBTE, SBMS
4	SBBR	SNBR, SBBR, SWNS, SBCN, SBGO, SBMC, SWLC, SBAX, SNYB, SNAP, SBMK, SNPD, SBUR, SBUL, SBCR, SJHG, SBCY, SWRD, SWFX, SWSI, SNKE, SWGI, SBPJ
5	SBBE	SBMQ, SBAM, SBIZ, SBSL, SBMD, SBHT, SBBE, SBAA, SBMA, SDOW, SBCJ, SNDC, SNFX, SBTU, SWGN
6	SBRF	SBMO, SBKG, SBJP, SNRU, SBFN, SBRF, SBNT
7	SBCT	SBDB, SBCG, SBDO, SBGA, SBCT, SBFI, SBGU, SBLO, SBMG, SBCD, SBFL, SSJA, SBJV, SBNF, SBML, SBDN
8	SBGL	SBVT, SBBQ, SBCF, SBBH, SNDT, SBGV, SBIP, SBJF, SNJR, SDAG, SBBZ, SBCB, SBGP, SBME, SDTK, SBGL, SBJR, SBRJ
9	SBPA	SBCX, SSER, SSIJ, SBPF, SBPK, SBPA, SJRG, SBSM, SSZR, SBNM, SBUG, SBCH, SBCM
10	SBGR	SNPY, SBVG, SBAU, SBBT, SBAE, SBKP, SBRP, SDSC, SBSR, SBSJ, SBSP, SBGR

Tabela A.4: Localização de *hubs* regionais e suas alocações obtidas com a primeira fase da estratégia do método de duas fases com  $n = 150$  aeroportos e  $p = 19$  *hubs* regionais.

Nro.	Aeroporto	<i>spokes</i>
1	SBEG	SWBC, SWBR, SWKO, SWOB, SBEG, SBMY, SWMW, SWPI, SWTP, SBUA, SBTF, SBIH, SBTB, SBSN, SBBV
2	SBSV	SBLP, SNGI, SBIL, SBLE, SBUF, SBPS, SBSV, SBTC, SBQV, SBPL, SBAR
3	SBFZ	SBFZ, SBJU, SBMS
4	SBBR	SNBR, SBBR, SWNS, SBCN, SBGO, SBMC, SWLC, SNYB, SBUL, SJHG, SWFX, SNKE, SWGI, SBPJ
5	SBVT	SBVT, SBCP
6	SBSL	SBSL, SBTE
7	SBCF	SBAX, SBCF, SBBH, SNDT, SBGV, SBIP, SNAP, SBMK, SNPD, SNJR, SBUR
8	SBCY	SBCR, SBAT, SBCY, SIZX, SWJN, SWRD, SWSI, SBVH
9	SBBE	SBMQ, SBAM, SBIZ, SBMD, SBHT, SBBE, SBAA, SBMA, SDOW, SBCJ, SNDC, SNFX, SBTU, SWGN
10	SBRF	SBMO, SBKG, SBJP, SNRU, SBRF
11	SBCT	SBCT, SBGU, SBCD, SSJA, SBJV
12	SBFI	SBDB, SBCA, SBFI, SSIJ, SSZR, SBNM, SBUG, SBCH,
13	SBGL	SBBQ, SBJF, SDAG, SBBZ, SBCB, SBME, SDTK, SBGL, SBJR, SBRJ
14	SBNT	SBFN, SBNT
15	SBPV	SBCZ, SBRB, SWNK, SWCA, SWEI, SWHT, SWLB, SDCG, SBTT, SWRP, SBJI, SBPV
16	SBPA	SBCX, SSER, SBPF, SBPK, SBPA, SJRG, SBSM
17	SBFL	SBCM, SBFL, SBNF
18	SBDN	SBCG, SBDO, SBLO, SBMG, SBAU, SBBT, SBAE, SBML, SBDN, SBSR
19	SBGR	SNPY, SBVG, SBKP, SBRP, SDSC, SBSJ, SBSP, SBGR

Tabela A.5: Localização de *hubs* regionais e suas alocações obtidas com a primeira fase da estratégia do método de duas fases com  $n = 150$  aeroportos e  $p = 24$  *hubs* regionais.

Nro.	Aeroporto	<i>spokes</i>
1	SBEG	SWBC, SWBR, SWKO, SWOB, SBEG, SBMY, SWMW, SWPI, SWTP, SBUA, SBTF, SBIH, SBTB, SBSN, SBBV
2	SBPS	SNGI, SBIL, SBPS, SBTC, SBQV
3	SBSV	SBLP, SBLE, SBUF, SBSV, SBPL, SBAR
4	SBFZ	SBFZ, SBJU, SBMS
5	SBBR	SNBR, SBBR, SBMC, SJHG, SWFX, SNKE, SWGI, SBPJ
6	SBVT	SBVT, SBCT
7	SBGO	SWNS, SBCN, SBGO, SWLC, SNYB, SBUL
8	SBSL	SBSL, SBTE
9	SBCF	SBAX, SBCF, SBBH, SNDT, SBGV, SBIP, SNAP, SBMK, SNPD, SNJR
10	SBCG	SBDB, SBCG, SBAU, SBSR
11	SBCY	SBCR, SBAT, SBCY, SIZX, SWJN, SWRD, SWSI, SBVH
12	SBBE	SBMQ, SBAM, SBIZ, SBMD, SBHT, SBBE, SBAA, SBMA, SDOW, SBCJ, SNDC, SNFX, SBTU, SWGN
13	SBRF	SBMO, SBKG, SBJP, SNRU, SBRF
14	SBCT	SBCT, SBCT, SSJA, SBJV
15	SBFI	SBDO, SBGA, SBFI, SSIJ, SSZR, SBNM, SBUG, SBCH
16	SBLO	SBGU, SBLO, SBMG, SBML, SBDN
17	SBGL	SBBQ, SBJF, SDAG, SBBZ, SBCB, SBME, SDTK, SBGL, SBJR, SBRJ
18	SBNT	SBFN, SBNT
19	SBPV	SBCZ, SBRB, SWNK, SWCA, SWEL, SWHT, SWLB, SDCG, SBTT, SWRP, SBJI, SBPV
20	SBPA	SBCX, SSER, SBPF, SBPK, SBPA, SJRG, SBSM
21	SBFL	SBCM, SBFL, SBNF
22	SBKP	SNPY, SBUR, SBBT, SBAE, SBKP, SBRP, SDSC
23	SBSP	SBSP
24	SBGR	SBVG, SBSJ, SBGR



Tabela A.6: Localização de *hubs* regionais e suas alocações obtidas com a primeira fase da estratégia do método de duas fases com  $n = 150$  aeroportos e  $p = 34$  *hubs* regionais.

Nro.	Aeroporto	<i>spokes</i>
1	SBRB	SBCZ, SBRB, SWNK, SWEI, SDCG, SBTT
2	SBMO	SBMO
3	SBEG	SWBC, SWBR, SWKO, SWOB, SBEG, SBMY, SWMW, SWTP, SBUA, SBTF, SBBV
4	SBMQ	SBMQ, SBAM, SBMD
5	SBPS	SNGI, SBIL, SBPS, SBTC, SBQV
6	SBSV	SBLP, SBLE, SBSV
7	SBFZ	SBFZ, SBJU, SBMS
8	SBBR	SBBR, SBMC
9	SBVT	SBVT, SBCP
10	SBGO	SWNS, SBGO, SWLC
11	SBSL	SBSL
12	SBCF	SBCF, SBBH, SNDT, SBGV, SBIP, SNAP, SBMK, SNJR
13	SBUL	SBCN, SBAX, SNYB, SNPD, SBUR, SBUL
14	SBCG	SBDB, SBCG, SBAU
15	SBCY	SBCR, SBAT, SBCY, SIZX, SWJN, SWRD, SWSI, SBVH
16	SBBE	SBBE
17	SBMA	SBIZ, SBMA, SDOW, SBCJ, SNFX, SBTU, SWGN
18	SBSN	SWPI, SBHT, SBIH, SBTB, SBSN
19	SBRF	SBKG, SBJP, SNRU, SBRF
20	SBTE	SBTE
21	SBCT	SBCT, SBCD, SSJA, SBJV
22	SBFI	SBDO, SBCA, SBFI, SSIJ, SSZR, SBNM, SBUG, SBCH
23	SBLO	SBGU, SBLO, SBMG, SBML, SBDN
24	SBGL	SBBQ, SBJF, SDAG, SBBZ, SBCB, SBME, SDTK, SBGL, SBJR, SBRJ
25	SBNT	SBFN, SBNT
26	SBPV	SWCA, SWHT, SWLB, SWRP, SBJI, SBPV
27	SBPA	SBCX, SSER, SBPF, SBPK, SBPA, SJRG, SBSM
28	SBFL	SBCM, SBFL, SBNF
29	SBAR	SBUF, SBPL, SBAR
30	SBKP	SBKP
31	SBRP	SNPY, SBBT, SBAE, SBRP, SDSC, SBSR
32	SBSP	SBSP
33	SBGR	SBVG, SBSJ, SBGR
34	SBPJ	SNBR, SJHG, SWFX, SBAA, SNDC, SNKE, SWGI, SBPJ

Tabela A.7: Localização de *hubs* regionais e suas alocações obtidas com a primeira fase da estratégia do método de duas fases com  $n = 150$  aeroportos e  $p = 40$  *hubs* regionais.

Nro.	Aeroporto	<i>spokes</i>
1	SBRB	SBCZ, SBRB, SWNK, SWEI, SDCG, SBTT
2	SBMO	SBMO
3	SBEG	SWBC, SWBR, SWKO, SWOB, SBEG, SBMY, SWMW, SBTF
4	SBMQ	SBMQ, SBAM, SBMD
5	SBIL	SBLP, SNGI, SBIL, SBTC, SBQV
6	SBPS	SBPS
7	SBSV	SBLE, SBSV
8	SBFZ	SBFZ, SBMS
9	SBBR	SBBR, SBMC
10	SBVT	SBVT, SBCP
11	SBGO	SWNS, SBGO, SWLC
12	SBSL	SBSL
13	SBCF	SBCF, SBBH, SNDT, SBGV, SBIP, SNAP, SBMK, SNJR
14	SBUL	SBCN, SBAX, SNYB, SNPD, SBUR, SBUL
15	SBCG	SBDB, SBCG
16	SBCY	SBCR, SBAT, SBCY, SIZX, SWJN, SWRD, SWSI, SBVH
17	SBBE	SBBE
18	SBMA	SBIZ, SBMA, SDOW, SBCJ, SNFX, SBTU, SWGN
19	SBSN	SWPI, SBHT, SBIH, SBTB, SBSN
20	SBJP	SBKG, SBJP
21	SBPL	SBJU, SBPL
22	SBRF	SNRU, SBRF
23	SBTE	SBTE
24	SBCT	SBCT, SBCD, SSJA, SBJV
25	SBFI	SBDO, SBGA, SBFI, SSIJ, SSZR, SBNM, SBUG, SBCH
26	SBLO	SBGU, SBLO, SBMG, SBDN
27	SBGL	SBBQ, SBJF, SDAG, SDTK, SBGL
28	SBRJ	SBBZ, SBCB, SBME, SBJR, SBRJ
29	SBNT	SBFN, SBNT
30	SBPV	SWCA, SWHT, SWLB, SWRP, SBJI, SBPV
31	SBBV	SWTP, SBUA, SBBV
32	SBPA	SBCX, SSER, SBPF, SBPK, SBPA, SJRG, SBSM
33	SBFL	SBCM, SBFL, SBNF
34	SBAR	SBUF, SBAR
35	SBKP	SBKP
36	SBRP	SNPY, SBRP, SDSC
37	SBSR	SBAU, SBBT, SBAE, SBML, SBSR
38	SBSP	SBSP
39	SBGR	SBVG, SBSJ, SBGR
40	SBPJ	SNBR, SJHG, SWFX, SBAA, SNDC, SNKE, SWGI, SBPJ

Tabela A.8: Localização de *hubs* centrais e suas alocações obtidas com a segunda fase da estratégia do método de duas fases com  $n = 150$  aeroportos,  $p = 10$  *hubs* regionais e  $q = 2, \dots, 6$

$q$ -hubs	hub central	hub regional
2	SBSV	SBSV, SBBE, SBFZ, SBRF
	SBGR	SBEG, SBBR, SBGL, SBGR, SBCT, SBPA
3	SBSV	SBSV, SBFZ, SBRF
	SBBR	SBEG, SBBR, SBBE
	SBGR	SBCT, SBGL, SBPA, SBGR
4	SBSV	SBSV, SBFZ, SBRF
	SBBR	SBEG, SBBR, SBBE
	SBGL	SBGL
	SBGR	SBCT, SBPA, SBGR
5	SBSV	SBSV
	SBBR	SBEG, SBBR, SBBE
	SBRF	SBFZ, SBRF
	SBGL	SBGL
	SBGR	SBCT, SBPA, SBGR
6	SBSV	SBSV
	SBBR	SBBR
	SBBE	SBEG, SBBE
	SBRF	SBFZ, SBRF
	SBGL	SBGL
	SBGR	SBCT, SBPA, SBGR

Tabela A.9: Localização de *hubs* centrais e suas alocações obtidas com a segunda fase da estratégia do método de duas fases com  $n = 150$  aeroportos,  $p = 19$  *hubs* regionais e  $q = 2, \dots, 6$

$q$ -hubs	<i>hub</i> central	<i>hub</i> regional
2	SBSV	SBSV, SBFZ, SBSL, SBBE, SBRF, SBNT
	SBGR	SBEG, SBBR, SBVT, SBCF, SBCY, SBCT, SBFI, SBGL, SBPV, SBPA, SBFL, SBDN, SBGR
3	SBSV	SBSV, SBFZ, SBRF, SBNT
	SBBR	SBEG, SBBR, SBSL, SBCY, SBBE, SBPV
	SBGR	SBCF, SBCT, SBFI, SBGL, SBPA, SBFL, SBDN, SBGR, SBVT
4	SBSV	SBSV, SBFZ, SBRF, SBNT
	SBBR	SBEG, SBBR, SBSL, SBCY, SBBE, SBPV
	SBGL	SBVT, SBCF, SBGL
	SBGR	SBCT, SBFI, SBPA, SBFL, SBDN, SBGR
5	SBSV	SBSV
	SBBR	SBEG, SBBR, SBSL, SBCY, SBBE, SBPV
	SBRF	SBFZ, SBRF, SBNT
	SBGL	SBVT, SBCF, SBGL
	SBGR	SBCT, SBFI, SBPA, SBFL, SBDN, SBGR
6	SBSV	SBSV
	SBBR	SBBR, SBCY, SBPV
	SBBE	SBEG, SBSL, SBBE
	SBRF	SBFZ, SBRF, SBNT
	SBGL	SBVT, SBCF, SBGL
	SBGR	SBCT, SBFI, SBPA, SBFL, SBDN, SBGR

Tabela A.10: Localização de *hubs* centrais e suas alocações obtidas com a segunda fase da estratégia do método de duas fases com  $n = 150$  aeroportos,  $p = 24$  *hubs* regionais e  $q = 2, \dots, 6$

$q$ -hubs	hub central	hub regional
2	SBSV	SBPS, SBSV, SBFZ, SBSL, SBBE, SBRF, SBNT
	SBGR	SBEG, SBBR, SBVT, SBGO, SBCF, SBCG, SBCY, SBCT, SBFI, SBLO, SBGL, SBPV, SBPA, SBFL, SBKP, SBSP, SBGR
3	SBSV	SBPS, SBSV, SBFZ, SBRF, SBNT
	SBBR	SBEG, SBBR, SBGO, SBSL, SBCY, SBBE, SBPV
	SBGR	SBVT, SBCF, SBCG, SBCT, SBFI, SBLO, SBGL, SBPA, SBFL, SBKP, SBSP, SBGR
4	SBSV	SBPS, SBSV, SBFZ, SBRF, SBNT
	SBBR	SBEG, SBBR, SBGO, SBSL, SBCY, SBBE, SBPV
	SBGL	SBVT, SBCF, SBGL
	SBSP	SBCG, SBCT, SBFI, SBLO, SBPA, SBFL, SBKP, SBSP, SBGR
5	SBSV	SBPS, SBSV
	SBBR	SBEG, SBBR, SBGO, SBSL, SBCY, SBBE, SBPV
	SBRF	SBFZ, SBRF, SBNT
	SBGL	SBVT, SBCF, SBGL
	SBSP	SBCG, SBCT, SBFI, SBLO, SBPA, SBFL, SBKP, SBPS, SBGR
6	SBSV	SBPS, SBSV
	SBBR	SBBR, SBGO, SBCY, SBPV
	SBBE	SBEG, SBSL, SBBE
	SBRF	SBFZ, SBRF, SBNT
	SBGL	SBVT, SBCF, SBGL
	SBSP	SBCG, SBCT, SBFI, SBLO, SBPA, SBFL, SBKP, SBSP, SBGR

Tabela A.11: Localização de *hubs* centrais e suas alocações obtidas com a segunda fase da estratégia do método de duas fases com  $n = 150$  aeroportos,  $p = 34$  *hubs* regionais e  $q = 2, \dots, 6$

$q$ -hubs	hub central	hub regional
2	SBSV	SBMO, SBMQ, SBPS, SBSV, SBFZ, SBSL, SBBE, SBMA, SBSN, SBRF, SBTE, SBNT, SBAR
	SBGR	SBRB, SBEG, SBBR, SBVT, SBGO, SBCF, SBUL, SBCG, SBCY, SBCT, SBFI, SBLO, SBGL, SBPV, SBPA, SBFL, SBKP, SBRP, SBSP, SBGR, SBPJ
3	SBSV	SBMO, SBPS, SBSV, SBFZ, SBRF, SBTE, SBNT, SBAR
	SBBR	SBRB, SBEG, SBMQ, SBBR, SBGO, SBSL, SBCY, SBBE, SBMA, SBSN, SBPV, SBPJ
	SBGR	SBVT, SBCF, SBUL, SBCG, SBCT, SBFI, SBLO, SBGL, SBPA, SBFL, SBKP, SBRP, SBSP, SBGR
4	SBSV	SBMO, SBPS, SBSV, SBFZ, SBRF, SBTE, SBNT, SBAR
	SBBR	SBRB, SBEG, SBMQ, SBBR, SBGO, SBSL, SBCY, SBBE, SBMA, SBSN, SBPV, SBPJ
	SBGL	SBVT, SBCF, SBGL
	SBSP	SBUL, SBCG, SBCT, SBFI, SBLO, SBPA, SBFL, SBKP, SBRP, SBSP, SBGR
5	SBSV	SBMO, SBPS, SBSV, SBFZ, SBRF, SBTE, SBNT, SBAR
	SBBR	SBRB, SBBR, SBGO, SBCY, SBPV, SBPJ
	SBMA	SBEG, SBMQ, SBSL, SBBE, SBMA, SBSN
	SBGL	SBVT, SBCF, SBGL
	SBSP	SBUL, SBCG, SBCT, SBFI, SBLO, SBPA, SBFL, SBKP, SBRP, SBPS, SBGR
6	SBSV	SBMO, SBPS, SBSV, SBAR
	SBBR	SBRB, SBBR, SBGO, SBCY, SBPV, SBPJ
	SBMA	SBEG, SBMQ, SBSL, SBBE, SBMA, SBSN, SBTE
	SBRF	SBFZ, SBRF, SBNT
	SBGL	SBVT, SBCF, SBGL
	SBSP	SBUL, SBCG, SBCT, SBFI, SBLO, SBPA, SBFL, SBKP, SBRP, SBPS, SBGR

Tabela A.12: Localização de *hubs* centrais e suas alocações obtidas com a segunda fase da estratégia do método de duas fases com  $n = 150$  aeroportos,  $p = 40$  *hubs* regionais e  $q = 2, \dots, 6$

$q$ -hubs	hub central	hub regional
2	SBSV	SBMO, SBMQ, SBIL, SBPS, SBSV, SBFZ, SBSL, SBBE, SBMA, SBSN, SBJP, SBPL, SBRF, SBTE, SBNT, SBAR
	SBGR	SBRB, SBEG, SBBR, SBVT, SBGO, SBCF, SBUL, SBCG, SBCY, SBCT, SBFI, SBLO, SBGL, SBRJ, SBPV, SBBV, SBPA, SBFL, SBKP, SBRP, SBSR, SBSP, SBGR, SBPJ
3	SBSV	SBMO, SBIL, SBPS, SBSV, SBFZ, SBJP, SBPL, SBRF, SBTE, SBNT, SBAR
	SBBR	SBRB, SBEG, SBMQ, SBBR, SBGO, SBSL, SBCY, SBBE, SBMA, SBSN, SBPV, SBBV, SBPJ
	SBGR	SBVT, SBCF, SBUL, SBCG, SBCT, SBFI, SBLO, SBGL, SBRJ, SBPA, SBFL, SBKP, SBRP, SBSR, SBSP, SBGR
4	SBSV	SBMO, SBIL, SBPS, SBSV, SBFZ, SBJP, SBPL, SBRF, SBTE, SBNT, SBAR
	SBBR	SBRB, SBGO, SBCY, SBPV, SBPJ
	SBMA	SBRB, SBEG, SBMQ, SBSL, SBBE, SBMA, SBSN, SBBV
	SBGR	SBVT, SBCF, SBUL, SBCG, SBCT, SBFI, SBLO, SBGL, SBRJ, SBPA, SBFL, SBKP, SBRP, SBSR, SBSP, SBGR
5	SBSV	SBMO, SBIL, SBPS, SBSV, SBFZ, SBJP, SBPL, SBRF, SBTE, SBNT, SBAR
	SBBR	SBBR, SBGO, SBCY, SBPV, SBPJ
	SBMA	SBRB, SBEG, SBMQ, SBSL, SBBE, SBMA, SBSN, SBBV
	SBGL	SBVT, SBCF, SBGL, SBRJ
	SBSP	SBUL, SBCG, SBCT, SBFI, SBLO, SBPA, SBFL, SBKP, SBRP, SBSR, SBPS, SBGR
6	SBSV	SBMO, SBIL, SBPS, SBSV, SBPL, SBTE, SBAR
	SBBR	SBRB, SBVT, SBCY, SBPV, SBPJ
	SBBE	SBEG, SBMQ, SBSL, SBBE, SBMA, SBSN, SBBV
	SBRF	SBFZ, SBBR, SBJP, SBRF, SBNT
	SBGL	SBVT, SBCF, SBGL, SBRJ
	SBSP	SBUL, SBCG, SBCT, SBFI, SBLO, SBPA, SBFL, SBKP, SBRP, SBSR, SBPS, SBGR