

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA



Gabriel Cavalcante Marinho Lopes

Estudo de alocação de Hubs para a demanda internacional

Trabalho de Graduação
2015

Engenharia Civil
Aeronáutica

Gabriel Cavalcante Marinho Lopes

Estudo de alocação de Hubs para demanda internacional

Orientador
Prof. Dr. Rodrigo Arnaldo Scarpel (ITA)

Engenharia Civil Aeronáutica

SÃO JOSÉ DOS CAMPOS
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA

2015

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

Divisão de Informação e Documentação

LOPES, Gabriel Cavalcante Marinho

Estudo de alocação de Hubs para demanda internacional

São José dos Campos, 2015.

78f.

Trabalho de Graduação – Curso de Engenharia Civil-Aeronáutica – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2015. Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Arnaldo Scarpel (ITA).

1. Alocação de Hub. 2. Demanda internacional. 3. Conexões de rotas. 4. Combustível. 5. Heurística.
I. Instituto Tecnológico de Aeronáutica II. Estudo de alocação de Hubs para demanda internacional

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

LOPES, Gabriel Cavalcante Marinho. **Estudo de alocação de Hubs para demanda internacional**. 2015. 78f. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

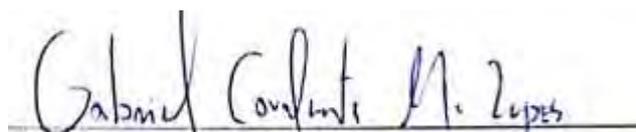
CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Gabriel Cavalcante Marinho Lopes

TÍTULO DO TRABALHO: Estudo de alocação de Hubs para demanda internacional

TIPO DO TRABALHO/ANO: Graduação / 2015

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



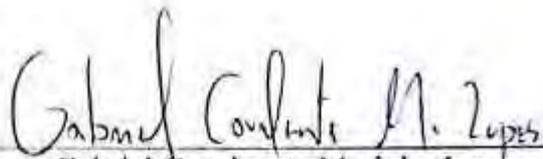
Gabriel Cavalcante Marinho Lopes

Rua Andrade Furtado, 955 – apto 1601 Coral

60192-072 – Fortaleza – MG

ESTUDO DE ALOCAÇÃO DE HUBS PARA A DEMANDA INTERNACIONAL

Essa publicação foi aceita como Relatório Final de Trabalho de Graduação



Gabriel Cavalcante Marinho Lopes
Autor



Prof. Dr. Rodrigo Arnaldo Scarpel (ITA)
Orientador



Prof. Dr. Eliseu Lucena Neto
Coordenador do Curso de Engenharia Civil Aeronáutica

São José dos Campos, 19 de novembro de 2015

Dedico este trabalho aos meus pais, que fizeram de tudo pra eu chegar aqui, a Luísa que sempre me incentivou para confecção do mesmo, ao meu padrinho e aos meus avós.

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus por sempre me dar o apoio espiritual necessário, e a paz espírito.

Aos meus pais, que sempre investiram muito na minha educação e são espelhos para minha formação acadêmica e como pessoa.

A Luísa, minha namorada, que sempre me incentivou e me deu apoio para confeccionar o projeto.

Aos meus amigos, em especial, aos da Civil que sempre foram companheiros na confecção não só desse, mas de muitos outros projetos durante o curso. Sem eles, a jornada até aqui teria sido muito mais difícil.

Aos meus familiares, por terem sido presentes durante a minha formação e, mesmo de longe, por terem me dado forças.

Aos professores do ITA, em especial, ao meu orientador Scarpel, que mesmo com tempo reduzido, pôde me dar apoio e gerar boas discussões a respeito do projeto.

“A persistência é o caminho do êxito.”
Charles Chaplin

Resumo

O aumento do número de voos internacionais, assim como o fato do custo de combustível ter se tornado o principal item de custo do transporte aéreo, tem levado as empresas aéreas a estudar tanto a sua frota para voos internacionais assim como as rotas por onde devem atuar. Nesse contexto, o Hub onde cada companhia aérea concentra seus voos é fundamental para torná-las mais competitivas, em um mercado de margem pequena, como é o de transporte aéreo. O presente trabalho de graduação objetivou a uma revisão das principais formulações e aplicações do problema de localização de Hubs, assim como a geração de uma série de análises para alocação de Hubs para voos internacionais com destino ou origem no Brasil. Sobre diferentes perspectivas, foi fornecida a melhor rota possível para cada agrupamento de países considerado, mas também foram gerados resultados preliminares, com premissas mais conservadoras, antes de chegar à rede ótima. Assim, pôde-se propor um passo-a-passo nas mudanças de rota, até chegar à melhor alocação, sobre as perspectivas consideradas. Alguns aeroportos, como o de Fortaleza, foram alocados como Hubs de maneira mais recorrente, tanto nas análises preliminares, assim como nas redes ótimas. Os valores financeiros de economia foram estimados para todas as redes propostas. Os resultados foram gerados via uma heurística que visava diminuir o tempo de execução das análises. Os resultados da heurística foram semelhantes aos gerados pela solução por exaustão, com um tempo de execução muito menor. A rotina ficará disponível para análises futuras com diferentes dados de entrada ou premissas.

Palavras-chave: alocação de Hub, demanda internacional, conexões de rotas, combustível, heurística.

Abstract

The number of international flights has increased and the cost of fuel have been the most important item of air transport costs and expenditures. It has led the airlines to study the best allocations of resources in regard to aircraft fleet and routes. In that context, the best Hubs allocation is important in order to provide competitive advantages for airlines in this very small margin market. This work aimed to reviewing the major mathematical models and applications of the Hub Location Problem. Furthermore, it aimed to generate a series of analyses of Hubs allocation for international flights landing or taking off in Brazil. From different perspectives, it was provided the best possible route for each clusters considered. Furthermore, it was provided too some preliminaries results, with more conservative assumptions, before came to the optimal route. Therefore, it was proposed a “step by step” of the implementation of the study. Some airports, like Fortaleza airport appeared more often in network solution, as much in preliminaries network as optimal solutions. The financial value of reducing fuel consumption was estimated. The results had been generated for a heuristic which reduced the running time of analyses. The results generated from heuristic were the same as those of exhaustion solution, with less running time. The code will be available for future analyses.

Keywords: Hub allocation, international demand, route’s connections, fuel, heuristic.

Lista de Figuras

Figura 1: Composição dos custos e das despesas do Transporte Aéreo Brasileiro, 2013.....	18
Figura 2: Evolução do número de passageiros pagos transportados – mercado internacional.	18
Figura 3: Esquema de uma possível configuração numa rede com formulação P-PLH.	25
Figura 4: Esquema de uma possível configuração numa rede com formulação Múltipla Alocação P-PLH.....	27
Figura 5: Variáveis de decisão fornecidas pela Heurística, rota Alemanha-Brasil.	44
Figura 6: Palpite inicial para iniciar a rotina da Heurística.....	47
Figura 7: Matriz auxiliar que calcula as distâncias de rota.	47
Figura 8: Rota fornecida para os três Hubs considerados no primeiro loop da Heurística.	48
Figura 9: Pseudocódigo da otimização para três Hubs.	49
Figura 10: Matriz das variáveis de decisão fornecida pela Heurística, fixando SBGR e SBGL como Hubs, para o agrupamento Europa.	52
Figura 11: Matriz das variáveis de decisão fornecida pela Heurística, fixando somente SBGR como Hub, para o agrupamento Europa.....	54
Figura 12: Matriz das variáveis de decisão fornecida pela Heurística, para a otimização total da malha do agrupamento Europa.	56
Figura 13: Matriz das variáveis de decisão fornecida pela Heurística, fixando SBGR e SBGL como Hubs, para o agrupamento América do Norte.	61
Figura 14: Matriz das variáveis de decisão fornecida pela Heurística, fixando somente SBGR como Hub, para o agrupamento América do Norte.	63
Figura 15: Matriz das variáveis de decisão fornecida pela Heurística, para a otimização total da malha para o agrupamento América do Norte.....	65
Figura 16: Dados de consumo de combustível do B777-300ER	68

Lista de Tabelas

Tabela 1: Tabela com a movimentação de voos dos principais aeroportos nacionais, para Europa e América do Norte.....	17
Tabela 2: Tabela com as cidades de origem dos passageiros que embarcam em voos internacionais nos principais Hubs nacionais, com a projeção de sua fatia de voos.....	20
Tabela 3: Tabela onde indica o problema selecionado, a área onde o conceito foi aplicado, o lugar e o estudo que serviu de referência.	36
Tabela 4: Tabela com o fluxo mensal de voos com destino na Europa.	40
Tabela 5: Tabela com o fluxo de voos mensais com a Alemanha como destino e com o interesse de voos de cada aeroporto doméstico.....	41
Tabela 6: Tabela com as distâncias de rota, em quilômetros, entre os aeroportos nacionais, e entre os aeroportos nacionais e o Aeroporto de Frankfurt (EDDF).	42
Tabela 7: Tabela com o número de voos e distância de rota para todos os pares origem-destino do agrupamento Europa.	50
Tabela 8: Tabela com o número de voos e distâncias totais de rota para cada país da Europa, segundo a malha proposta na primeira análise.....	53
Tabela 9: Tabela com o número de voos e distâncias totais de rota para cada país da Europa, segundo a malha proposta na segunda análise.	55
Tabela 10: Tabela com o número de voos e distâncias totais de rota para cada país da Europa, segundo a malha proposta na segunda análise.	57
Tabela 11: Tabela com os preços médios do QAV por região, nas 12 últimas semanas de 2014.....	58
Tabela 12: Valor do fator corretivo para cada região.....	58
Tabela 13: Tabela com o número de voos e distância de rota para todos os pares origem-destino do agrupamento América do Norte.....	59

Tabela 14: Tabela com o número de voos e distâncias totais de rota para cada país da América do Norte, segundo a malha proposta na primeira análise.....	62
Tabela 15: Tabela com o número de voos e distâncias totais de rota para cada país da América do Norte, segundo a malha proposta na segunda análise.	64
Tabela 16: Tabela com o número de voos e distâncias totais de rota para cada país da América do Norte, segundo a malha proposta na segunda análise.	66
Tabela 17: Tabela com a economia de combustível referente à Análise 1, agrupamento Europa.	69
Tabela 18: Tabela com a economia de combustível referente à Análise 2, agrupamento Europa.	69
Tabela 19: Tabela com a economia de combustível referente à Análise 3, agrupamento Europa.	69
Tabela 20: Tabela com a economia de combustível referente à Análise 1, agrupamento América do Norte.	70
Tabela 21: Tabela com a economia de combustível referente à Análise 2, agrupamento América do Norte.	71
Tabela 22: Tabela com a economia de combustível referente à Análise 3, agrupamento América do Norte.	71

Lista de Abreviaturas e siglas

ANAC: Agência Nacional de Aviação Civil

SBGR: Aeroporto Internacional de Guarulhos

SBGL: Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro

SBBR: Aeroporto Internacional de Brasília

SBKP: Aeroporto Internacional de Campinas

SBCF: Aeroporto Internacional de Confins

SBSV: Aeroporto Internacional de Salvador

SBRF: Aeroporto Internacional de Recife

SBFZ: Aeroporto Internacional de Fortaleza

SBPA: Aeroporto Internacional de Porto Alegre

SBEG: Aeroporto Internacional de Manaus

SBFL: Aeroporto Internacional de Florianópolis

Sumário

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Motivação	16
1.2	Justificativa	17
1.3	Objetivos	19
1.4	Hipóteses / Escopo	19
1.5	Organização do texto	21
2	REFERENCIAL TEÓRICO	22
2.1	Modelos matemáticos e classificação do PLH	23
2.2	PLH Simples	24
2.3	P-PLH	25
2.4	Múltipla Alocação P-PLH	26
2.5	P-PLH com custos de conexão fixos	28
2.6	Mínimo valor de fluxo no modelo de conexões	29
2.7	P-PLH com capacidade limitada	29
2.8	P-PLH Plano Contínuo	30
2.9	Multi Objetiva P-PLH	31
2.10	Problema de Locação Central de P-Hub	32
2.11	Problema de Cobertura de Localização P-Hub	33
2.12	Problema de Cobertura de Localização Set-Hub	34
2.13	Problema de Cobertura Máxima de Localização	35
2.14	Aplicações em casos reais	36
3	ANÁLISE EMPÍRICA	38
3.1	Escolha da Formulação Matemática	38
3.2	Dados	40
3.3	Análises	43
3.4	Solução Computacional	44
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	50
4.1	Agrupamento Europa	50
4.1.1	Análise 1: Agrupamento Europa	51
4.1.2	Análise 2: Agrupamento Europa	53

4.1.3	Análise 3: Agrupamento Europa	55
4.1.4	Análise com preço do QAV (Agrupamento Europa)	57
4.2	Agrupamento América do Norte	58
4.2.1	Análise 1: Agrupamento América do Norte	60
4.2.2	Análise 2: Agrupamento América do Norte	63
4.2.3	Análise 3: Agrupamento América do Norte	65
4.2.4	Análise com preço do QAV (Agrupamento América do Norte).....	67
4.3	Estimativa da economia de combustível	68
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	73
5.1	Conclusão	73
5.2	Trabalhos Futuros	74
	REFERÊNCIAS	75

1 INTRODUÇÃO

O problema de localização de Hub é uma nova extensão do problema clássico de localização de instalações. Hubs são instalações que trabalham como consolidadores, conectores e transferidores de fluxo entre origens e destinos preestabelecidos.

De acordo com [1], Hubs são aplicados para diminuir o número de ligações entre os nós de origem e destino. Por exemplo, uma rede com k nós completamente conectada, sem nenhum Hub, tem exatamente $k(k - 1)$ ligações. Entretanto, se um nó tipo Hub é escolhido de modo a ligar todos os outros nós não Hubs, conhecidos também como spokes, vão existir exatamente $2(k - 1)$ ligações que atendem todos os pares origem-destino. Assim, com o uso de poucos recursos, os pares origem-destino podem ser atendidos mais eficientemente do que com uma rede completamente conectada.

1.1 Motivação

Dentre os diversos problemas na Teoria de Localização de instalações, um que tem se mostrado de muita importância é o de Localização de Hubs. Este fornece a localização do nó onde devem ser feitas as conexões entre os diversos pares origem-destino de modo otimizar uma métrica, normalmente minimização dos custos relacionados a alocação da rota.

De acordo com [1], a indústria de telecomunicação é um dos mais antigos usuários do conceito de alocação de Hub. Entretanto, sistemas logísticos, companhias de frete e o sistema de transporte aéreo são os principais aplicadores do conceito de Hub. Quanto ao último, surge o questionamento: A malha aérea brasileira usa o conceito de alocação de Hub da melhor maneira possível?

A questão é um pouco complexa de responder, visto que os custos associados à alocação de um Hub dependem de sua estrutura. Apesar da distância total entre os arcos em uma rede com Hub ser menor do que numa rede sem Hub; com os mesmos pares origem-destino, a distância total viajada por passageiros pode ser maior, formando assim uma estrutura de custos desfavorável. Além disso, diversos outros fatores devem ser considerados como a disponibilidade de destinos do aeroporto, o número de conexões domésticas que estão

disponíveis, a capacidade de abrigar novos voos ou de se expandir a capacidade, o impacto que esses novos voos vão ter na operação do aeroporto (atrasos).

Atualmente, temos que a maioria das rotas internacionais com origem, destino ou conexão no Brasil passam pelo Aeroporto Internacional de Guarulhos (SBGR) ou pelo Aeroporto Internacional do Galeão (SBGL), como podemos notar pela Tabela 1. Todavia, não se sabe se a configuração de voos concentrados nesses dois centros é a mais rentável para as companhias aéreas.

Tabela 1: Tabela com a movimentação de voos dos principais aeroportos nacionais, para Europa e América do Norte.

Aeroporto	Número de voos (mensal)
SBGR	2903
SBGL	1021
Demais aeroportos	1173

A questão fundamental que se deseja responder é: para os principais destinos internacionais, considerados os países da Europa e da América do Norte, se alocássemos outro Hub, qual seria? Quais rotas seriam realocadas? Quanto isso impactaria na estrutura de custos das companhias aéreas? Ainda nesse contexto, poderá se responder qual seria a melhor estrutura de Hubs para voos internacionais.

1.2 Justificativa

De acordo com o Anuário de Transporte Aéreo da ANAC [2], o principal item dos custos e despesas de voos, em 2013, foi o combustível de aeronaves, com participação de 37,3% no custo total. Assim como em anos anteriores, 30,1% em 2009 e 38,8% em 2012. A Figura 1 mostra a composição dos principais custos e despesas no Transporte Aéreo Brasileiro em 2013.

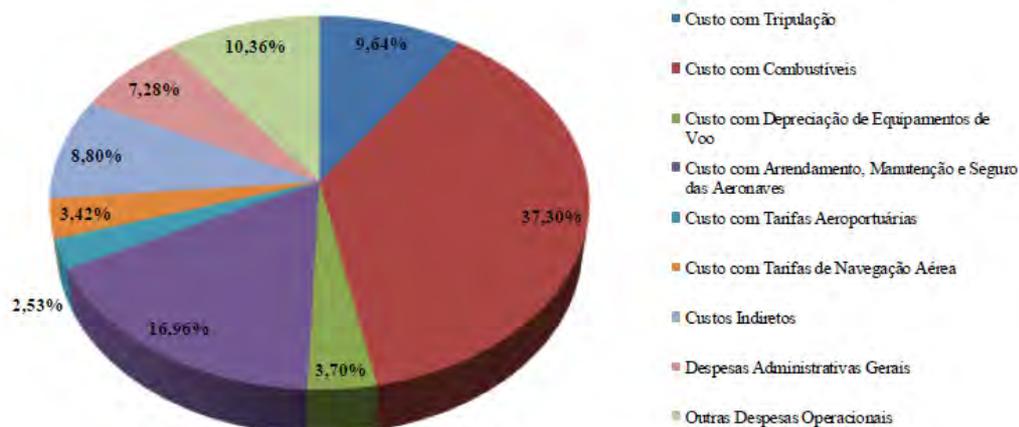


Figura 1: Composição dos custos e das despesas do Transporte Aéreo Brasileiro, 2013.

O número de passageiros internacionais com origem ou destino no Brasil teve um forte crescimento, chegando a 19,2 milhões em 2013. Um crescimento de 110% em relação a 2004. A Figura 2 mostra a evolução do número de passageiros internacionais.

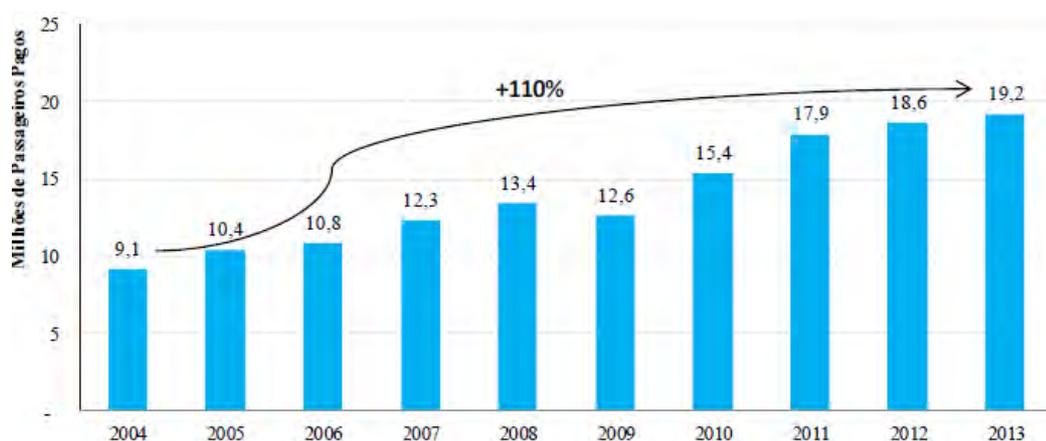


Figura 2: Evolução do número de passageiros pagos transportados – mercado internacional.

Nesse contexto, com o crescimento do número de passageiros e de rotas internacionais com origem e destino no Brasil e considerando ainda o combustível como o principal custo na indústria, torna-se importante o estudo da malha de rotas internacionais no Brasil. Estudo esse onde será testada a alocação de novos Hubs, em atuação conjunta com os já existentes, com redistribuição de rotas de modo a diminuir a distância viajada no somatório de todos os voos da rede. Será estudada também a redistribuição total de Hubs, ou seja, será feita a otimização de toda a malha aérea sem se fixar os Hubs atuais, de modo a entender quais seriam os melhores aeroportos para se concentrar os voos para as principais rotas internacionais.

A realocação de rotas com distribuição de novos Hubs pode ter um impacto significativo nas distâncias viajadas, conseqüentemente no consumo de combustível, gerando uma considerável economia para as companhias aéreas.

1.3 Objetivos

Esse projeto tem como objetivo desenvolver um estudo sobre a melhor alocação possível de Hubs para os voos internacionais com origem ou destino no Brasil. Esse estudo foi desenvolvido a partir de uma solução computacional, que ficará disponível para futura utilização, sendo possível mudar as hipóteses iniciais de desenvolvimento desse projeto.

1.4 Hipóteses / Escopo

Para se resolver o problema de alocação de Hub foi necessária escolher uma formulação na qual fosse possível aplicar os dados disponíveis sobre as rotas internacionais. Todavia, por se tratar de um problema complexo de otimização, algumas premissas tiveram que ser admitidas para que se pudesse suprir a falta de dados sobre algumas variáveis do modelo escolhido.

Uma das premissas que foi tomada é referente à origem do passageiro que viaja para o exterior a partir do Aeroporto de Guarulhos (SBGR) ou do Aeroporto do Galeão (SBGL), os dois grandes Hubs atuais. A base de dados de Voo Regular Ativo (VRA) da ANAC [43] só disponibiliza a origem e destino final dos voos internacionais. Ou seja, têm-se quantos voos saíram dos Hubs nacionais para todos os destinos internacionais, mas não se sabe de que cidade do Brasil, inicialmente, aquele passageiro é originário. Para superar essa adversidade, foi criada uma hipótese que a origem do passageiro que toma voos internacionais em Guarulhos (SBGR) ou no Galeão (SBGL) é proporcional ao movimento doméstico dos aeroportos nacionais. Ou seja, a partir da fatia de voos domésticos de cada aeroporto nacional, calculou-se a origem dos passageiros que embarcam em voos internacionais em Guarulhos (SBGR) e no Galeão (SBGL) e assim estimou-se o interesse por voos internacionais de cada aeroporto brasileiro.

Para se calcular a cidade de origem do passageiro que toma os voos internacionais, foi usada a base de Voo Regular Ativo da ANAC [43] dos últimos 12 meses, filtrando o tipo de

linha para voos nacionais e regionais. Assim tinha-se para cada aeroporto o número de voos domésticos naquele período. Para as cidades que possuíam mais de um aeroporto, somou-se a movimentação dos mesmos, como, por exemplo, somou-se a movimentação do Aeroporto de Congonhas (SBSP) e do Aeroporto de Guarulhos (SBGR) para se obter a fatia de voos domésticos da região metropolitana de São Paulo. Consideraram-se, para análise, os aeroportos nacionais que possuíam maior quantidade de voos e juntos representavam 2/3 da fatia de voos domésticos. Assim, para se calcular a origem dos passageiros dos voos internacionais, fez-se uma proporção simples para os aeroportos selecionados como mais representativos. O resultado segue na Tabela 2.

Tabela 2: Tabela com as cidades de origem dos passageiros que embarcam em voos internacionais nos principais Hubs nacionais, com a projeção de sua fatia de voos.

Aeroporto	Cidade	% número de voos nacionais	% projetada de interesse por voos internacionais
SBGR+SBSP	SÃO PAULO	17%	26%
SBGL+SBRJ	RIO DE JANEIRO	10%	15%
SBBR	BRASÍLIA	8%	12%
SBKP	CAMPINAS	7%	10%
SBCF	CONFINS	6%	9%
SBSV	SALVADOR	5%	7%
SBPA	PORTO ALEGRE	4%	5%
SBRF	RECIFE	3%	5%
SBFZ	FORTALEZA	3%	5%
SBEG	MANAUS	2%	3%
SBFL	FLORIANÓPOLIS	2%	3%

Foi feita uma projeção do interesse por voos internacionais nas principais cidades que possuem aeroportos com capacidade de atender rotas internacionais, a partir da fatia de voos domésticos daquele aeroporto. Por exemplo, temos que os aeroportos de São Paulo movimentam 17% dos voos domésticos. Segundo a premissa adotada, dos voos internacionais que saem de Guarulhos, somente 26% das pessoas tem origem em Guarulhos (ou região metropolitana de São Paulo), o restante dos passageiros tem origem no Rio (15%), em Brasília (12%), e assim sucessivamente.

Dada essa primeira premissa, pode-se esboçar a malha corrente das rotas internacionais com origem ou destino no Brasil, incluindo o aeroporto doméstico de origem do passageiro.

A formulação escolhida para otimizar a alocação de Hubs foi a minimização de custos de conexão na rede. Na alocação de um Hub existem vários custos associados, mas o mais

representativo para a empresa aérea é o custo de combustível gasto nas rotas, como citado anteriormente. Assim, foi feita a otimização minimizando a distância total percorrida nos voos, visto que o gasto de combustível é, de forma simplificada, proporcional à distância viajada. Não foram adicionados outros custos pela falta de uma base detalhada de dados de custos das companhias aéreas e pela dificuldade em supor como essa base seria influenciada pela mudança dos Hubs.

1.5 Organização do texto

O trabalho está estruturado como se segue. No capítulo 2, é apresentada uma revisão teórica do problema de alocação de Hubs, serão apresentadas as principais formulações desse tipo de problema e as variadas aplicações nos últimos anos. No capítulo 3, será apresentada uma análise empírica, onde será explicada a formulação matemática utilizada no trabalho, assim como as bases de dados utilizadas. Além disso, será exposta a metodologia de análise de resultados e uma explicação da solução computacional utilizada. No capítulo 4, os resultados para todos os tipos de análises serão expostos e discutidos. No capítulo 5, será feita uma conclusão dos resultados alcançados, além de possíveis trabalhos futuros a partir do presente trabalho de graduação.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O problema de localização de Hub é uma das áreas de pesquisa na Teoria de Localização. Como já citado, a indústria de telecomunicação foi pioneira no uso conceito de Hubs em redes complexas. Entretanto, vários são os estudos e publicações atrelando esse conceito a vários outros segmentos, como indústrias de fretes, transporte público e, principalmente, transporte aéreo.

Originalmente, Hakimi [3], em 1964, foi o primeiro a publicar um artigo na área de otimização de nós que gerou motivação para conceitos similares no Problema de Localização de Hub (PLH). Em 1985, Toh e Higgins [4] discutiram a aplicação de alocação de Hub em redes para transporte aéreo como uma área de pesquisa muito pertinente. O primeiro artigo no campo do Problema de Localização de Hub (PLH), apresentando uma formulação matemática e um método de solução, foi de autoria de O’Kelly [5], em 1986. Desde então, muitos artigos tem sido divulgados nesse campo. Existia uma forte tendência de se focar no modelamento e otimização até final da década de 1990; enquanto que pesquisas focadas no estudo de métodos avançados de solução surgiram nos anos mais recentes.

Considerado como autor mais importante dos estudos preliminares na área do Problema de Localização de Hub, O’Kelly [5] foi o primeiro a desenvolver um modelo de formulação matemática quadrático para o PLH. Depois disso, Campbell [6], em 1994, propôs várias formulações matemáticas para PLH, com funções objetivo semelhantes as dos problemas clássicos de Localização de Instalações. Além disso, Aykin [7] e Klineciz [8] tiveram papel importante no avanço desse campo de estudo. Recentemente, Campbell e O’Kelly [9] publicaram sobre a origem e motivação do PLH, assim como algumas deficiências desse campo.

Muitas formulações matemáticas foram propostas para se resolver o Problema de Localização de Hub. No caso do presente projeto, foi escolhida uma formulação semelhante a uma já proposta nos artigos de referência, com algumas modificações nas condições de contorno. Mais de um modelo poderia ser usado no caso da malha de rotas brasileira, mas a formulação foi selecionada devido a maior facilidade de obtenção dos dados necessários a se satisfazer as condições de contorno e a função objetivo, sem a necessidade de se criar muitas premissas que poderiam prejudicar os resultados obtidos.

A seguir, será feita uma breve explicação de alguns dos modelos matemáticos estudados. Mas antes, seguem algumas explicações sobre a linguagem usada nos modelos, para que as formulações possam ser mais facilmente compreendidas.

2.1 Modelos matemáticos e classificação do PLH

Para se padronizar a linguagem utilizada nas formulações dos diversos PLHs, alguns conceitos foram criados pelos autores das principais publicações.

- Domínios de Solução:
 - Rede: todos os nós da rede são candidatos à solução;
 - Discreto: um subconjunto dos nós da rede são candidatos à solução;
 - Contínuo: os candidatos à solução formam um plano ou esfera.
- Critério da função objetivo:
 - Mini-Max: minimização do maior dos custos de transporte dos nós de origem para os nós de destino em uma rede);
 - Mini-Sum: minimização do custo total incorrido da alocação de nós como Hubs e da instalação da rede ligando os pares origem-destino.
- Determinação do número de Hubs a ser alocado:
 - Exógeno: o número de Hubs a ser alocado é previamente conhecido;
 - Endógeno: o número de Hub a ser alocado não é previamente conhecido, mas sim parte da solução do problema.
- Número de Hubs na solução: simples (somente um) ou múltiplo.
- Capacidade do Hub: ilimitada ou limitada.
- Custo de alocação de nós como Hub: sem custo, com custos fixos ou com custos variáveis.
- Ligação de nós spokes com nós Hub:
 - Ligação simples: cada nó só pode ser ligado a um único Hub;
 - Ligação Múltipla: cada nó pode se ligar a mais de um Hub.
- Custo na conexão dos nós: sem custo, com custos fixos ou com custos variáveis.

A seguir seguem os modelos matemáticos estudados.

2.2 PLH Simples

O’Kelly [10], em 1987, propôs uma formulação matemática para resolver um PLH, no qual o critério da função objetivo é Mini-Sum, o domínio da solução é Rede, o número de Hubs a ser alocado é exógeno e tem valor unitário, não há custo na instalação do Hub (no caso do transporte aéreo, esse fato pode ser entendido como se não houvesse necessidade de mudanças estruturais no aeroporto, o mesmo já tem capacidade de ser um Hub), a capacidade do Hub é ilimitada, e os nós spokes só podem se ligar ao Hub, posteriormente, definido.

As entradas do problema são:

- h_{ij} , que representa a quantidade de fluxo entre os nós i e j , onde i e $j \in \{0, n\}$ com n sendo o número de nós da rede;
- C_{ij} , que representa o custo associado da ligação do nó spoke i com o nó Hub j .

As saídas do problema são:

- Y_{ij} , uma variável binária que é igual a 1 se o nó i ou j for um Hub e é igual a 0 se o nó i e j ambos não sejam um Hub. Y_{jj} é igual a 1 se o nó j for um Hub.

Temos, portanto, a função objetivo representada pela equação [1].

$$MIN Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n h_{ik} (C_{ij} + C_{jk}) Y_{ij} Y_{ji} \quad [1]$$

Essa formulação está sujeita as seguintes condições de contorno:

$$\sum_j Y_{jj} = 1 \quad [2]$$

$$Y_{ij} - Y_{jj} \leq 0 \quad \forall i, j \quad [3]$$

$$Y_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \quad [4]$$

A equação [1] minimiza o custo total de transferência naquela rede instalando um único Hub. A equação [2] limita a existência de um único Hub. A desigualdade [3] estipula que um dado nó i só pode ser ligado a um nó j , se este for um Hub. A equação [4] define a variável de decisão como sendo binária.

Como temos um único Hub e todos os outros nós devem ser ligados a esse, a equação [1] pode ser reescrita, de modo a ser linearizada:

$$\begin{aligned} \sum_i \sum_j \sum_k h_{ik} (C_{ij} + C_{jk}) Y_{ij} Y_{ji} &= \sum_i \sum_j C_{ij} Y_{ij} \sum_k h_{ik} + \sum_j \sum_i C_{ji} Y_{ij} \sum_k h_{ki} = \\ &= \sum_i \sum_j C_{ji} Y_{ij} (O_i + D_i) \end{aligned} \quad [5]$$

Onde O_i e D_i são os fluxos totais de entrada e saída de um dado nó i , respectivamente. Mesmo com a linearização da função objetivo temos que o número de variáveis de decisão é da ordem $O(N^2)$.

2.3 P-PLH

Essa formulação matemática é muito semelhante à apresentada anteriormente. Nesse caso, o critério da função objetivo é Mini-Sum, o domínio da solução é Rede, pode-se chegar a qualquer nó i da rede a partir de qualquer nó j (rede completamente conectada), a capacidade do Hub é ilimitada e não há custo atrelado de transformar um nó i qualquer em um Hub. A diferença é que o número de Hubs a ser alocado é exógeno e tem valor igual a P . Os nós spokes só podem ser conectados aos Hubs definidos. Além disso, numa ligação qualquer entre um par origem-destino, mais de um Hub pode ser atravessado. Ou seja, um Hub pode ser ligado a outro Hub. Esse fato é ilustrado na Figura 3.



Figura 3: Esquema de uma possível configuração numa rede com formulação P-PLH.

Todas as entradas da formulação PLH Simples são usadas na formulação P-PLH. Todavia, uma entrada é introduzida: o fator de desconto α ($0 \leq \alpha \leq 1$) que foi criado para representar as economias de escala na ligação de um Hub a outro Hub. Como o custo na ligação entre dois Hubs é menor do que o custo na ligação entre um nó spoke e um Hub, o custo da ligação C_{ij} foi multiplicado por α no modelo, quando os nos i e j são Hubs. As saídas do modelo são as mesmas. Tem-se, a função objetivo definida pela equação [6].

$$MIN Z = \sum_i \sum_k C_{ik} Y_{ik} \sum_j h_{ij} + \sum_k \sum_i C_{kj} Y_{ik} \sum_j h_{ji} + \alpha \sum_i \sum_j \sum_k \sum_m h_{ij} C_{km} Y_{ik} Y_{jm} \quad [6]$$

Sujeito a:

$$\sum_j Y_{ij} = 1 \forall i \quad [7]$$

$$\sum_j Y_{jj} = P \quad [8]$$

$$Y_{ij} - Y_{jj} \leq 0 \forall i, j \quad [9]$$

$$Y_{ij} \in \{0, 1\} \forall i, j \quad [10]$$

A equação [6] minimiza o custo total de transferência naquela rede. O primeiro termo da equação [6] representa o custo total de transferência entre um nó spoke i que será conectado com um nó spoke j via um nó Hub k . O segundo termo é atrelado ao custo total de transferência no outro sentido do fluxo, ou seja, do nó j para o nó i . O terceiro termo representa o custo de transferência entre dois Hubs conectados. A equação [7] define que um nó spoke é conectado a somente um Hub. A equação [8] define que serão alocados precisamente P nós como Hubs. A desigualdade [9] limita que um nó i só será conectado a um nó j se esse for um Hub. A equação [10] define que as variáveis de decisão são binárias.

2.4 Múltipla Alocação P-PLH

Enquanto que a formulação P-PLH é quadrática, Campbell [11], em 1991, propôs uma formulação matemática linear. A formulação é semelhante a P-PLH. Todavia, nessa formulação um nó spoke pode ser alocado a mais de um Hub, por isso o nome Múltipla alocação P-PLH. Ou seja, o fluxo em um nó i qualquer pode ser dividido entre mais de um Hub, para diferentes destinos finais. Esse fato é ilustrado na Figura 4.

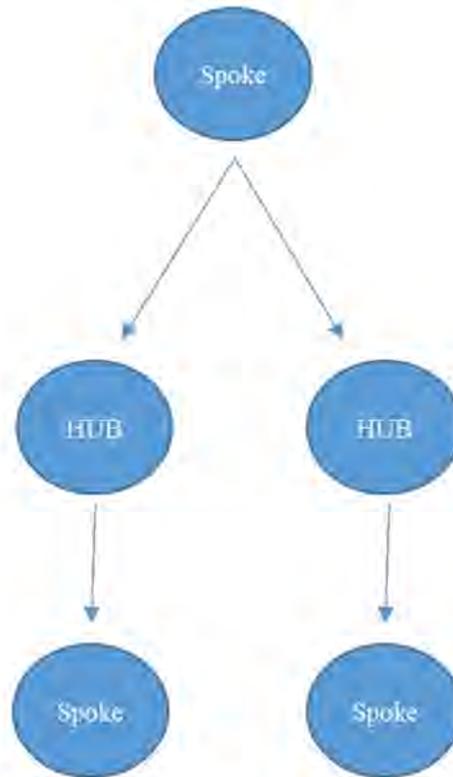


Figura 4: Esquema de uma possível configuração numa rede com formulação Múltipla Alocação P-PLH.

Todas as entradas do P-PLH são usadas novamente. Além disso, a variável C_{ij}^{km} é definida como custo de transferência entre dois nós i e j , via possível passagem pelos Hubs k e m . A formulação de C_{ij}^{km} é definida pela equação [11].

$$C_{ij}^{km} = C_{ik} + \alpha C_{km} + C_{mj} \quad [11]$$

As saídas do modelo são:

- X_j , que tem valor unitário quando o nó j é definido como Hub e tem valor nulo, caso contrário;
- Z_{ij}^{km} representa o fluxo do nó i para o nó j via Hubs instalados em nós k e m .

A função objetivo é definida pela equação [12].

$$MIN \sum_i \sum_j \sum_k \sum_m C_{ij}^{km} h_{ij} Z_{ij}^{km} \quad [12]$$

Sujeito a:

$$\sum_k X_k = P \quad [13]$$

$$\sum_k \sum_m Z_{ij}^{km} = 1 \quad \forall i, j \quad [14]$$

$$Z_{ij}^{km} \leq X_m \quad \forall i, j, k, m \quad [15]$$

$$Z_{ij}^{km} \leq X_k \quad \forall i, j, k, m \quad [16]$$

$$Z_{ij}^{km} \geq 0 \quad \forall i, j, k, m \quad [17]$$

$$X_k \in \{0,1\} \quad \forall k \quad [18]$$

A equação [12] minimiza o custo de transferência na rede. A equação [13] restringe que somente P Hubs serão selecionados. A equação [14] estipula que cada par origem-destino (i, j) é alocado com um par de Hubs (k, m) . Note que k e m podem ser o mesmo nó, portanto qualquer par origem-destino pode ser ligado por um único Hub. As desigualdades [15] e [16] garantem que o fluxo de demanda entre uma origem i e um destino j não pode ser atravessado por um par (k, m) , a não ser que esses sejam Hubs. Além disso, as equações [17] e [18] definem os tipos de variáveis de decisão.

Uma das maiores dificuldades dessa formulação é que os números de variáveis de decisão Z_{ij}^{km} podem ser extremamente grande, ordem $O(N^4)$. Em uma rede muito complexa, esse fato pode inviabilizar a solução com essa formulação.

2.5 P-PLH com custos de conexão fixos

Em todas as formulações anteriores foram considerados somente os custos de transferências entre os diversos pares origem-destino nas redes. Todavia, em 1994, Campbell [12] sugeriu outro modelo que considera um custo fixo devido à instalação da conexão, além do custo atrelado a conexão dos nós. As entradas e saídas do modelo são semelhantes àquelas da formulação Múltipla Alocação P-PLH. Além disso, é criado um dado de entrada g_{ik} referente ao custo fixo de instalação da conexão entre o nó i e o Hub k . W_{ik} é uma variável de decisão que tem valor unitário se há conexão entre os nós i e k , sendo nula, caso contrário. A função objetivo é a mesma do critério de Múltipla Alocação P-PLH, sendo que se adiciona o termo da expressão [19], que é referente aos custos fixos das conexões na rede.

$$\sum_i \sum_k g_{ik} W_{ik} \quad [19]$$

2.6 Mínimo valor de fluxo no modelo de conexões

Ao invés de impor que um nó spoke só pode se conectar a um Hub, em alguns momentos é mais conveniente impor que o fluxo entre uma ligação spoke-Hub tem que ser superior a um valor limite. Isso impõe que um nó só seja alocado como Hub se houver conexões que passem por ele com um fluxo preestabelecido como mínimo. Campbell [12], em 1994, formulou esse problema de maneira análoga à P-PLH, acrescentando a condição de contorno do fluxo mínimo. As entradas do modelo são similares à Múltipla Alocação P-PLH. Além disso, o fator L_{ik} é adicionado ao modelo, referindo-se ao fluxo mínimo entre os nós i e k , de modo que o nó k possa ser alocado como Hub. As saídas do modelo são semelhantes às da formulação Múltipla Alocação P-PLH. As equações [20] e [21] são as equações referentes às condições de contorno que devem ser adicionadas ao modelo de Múltipla Alocação P-PLH.

$$Y_{ik} + Y_{jm} - 2Z_{ij}^{km} \geq 0 \quad \forall i, j, k, m \quad [20]$$

$$\sum_m \sum_j h_{ij} Z_{ij}^{km} + \sum_p \sum_s h_{pi} Z_{pi}^{sk} \geq L_{ik} Y_{ik} \quad [21]$$

A desigualdade [20] limita que o fluxo entre um nó de origem i com destino em j só pode ser transportado via Hubs k e m , caso:

- Um nó spoke i seja conectado a um hub k .
- Um nó spoke i seja conectado a um hub m .

A desigualdade [21] garante que um limite de fluxo mínimo seja imposto de modo a existir a ligação spoke-Hub. O primeiro termo da equação computa o fluxo total dos nós spokes para os Hubs. O segundo termo da equação computa o fluxo total de cada origem via Hub para determinado nó spoke passando por outro Hub.

2.7 P-PLH com capacidade limitada

Campbell [12], em 1994, propôs uma formulação na qual a capacidade do Hub limita o fluxo de passageiros na rede. Ou seja, o fluxo de entrada e saída no Hub, deve ser menor ou igual a sua capacidade de operação. O problema tem formulação semelhante ao problema de

Múltipla Alocação P-PLH, tanto quanto às entradas como às saídas do modelo. Adiciona-se à formulação, todavia, o fator θ_k que denota a capacidade do nó k . A única condição de contorno adicionada no modelo está descrita pela equação [22].

$$\sum_m \sum_i \sum_j h_{ij} Z_{ij}^{km} + \sum_s \sum_i \sum_j h_{ij} Z_{ij}^{sk} \leq \theta_k X_k \quad \forall k \quad [22]$$

O primeiro e o segundo termo da desigualdade [22] representam o fluxo de entrada e saída em um determinado Hub, respectivamente.

2.8 P-PLH Plano Contínuo

O problema de Locação de Hub normalmente é modelado como uma rede ou como um problema de locação de instalações discreto. Entretanto, existem estudos que consideram um domínio contínuo como possível solução. Nesse tipo de estudo o domínio de solução não é uma série particular de nós num gráfico, mas sim um plano ou uma esfera, como proposto por Aykin [13], em 1995. Nesse problema um nó spoke só pode ser conectado a um único Hub. Casos especiais desse problema, com somente um ou dois Hubs foram primeiramente solucionados por O'Kelly [5], em 1986. Depois disso, Aykin e Brown [14], em 1992, estenderam a formulação para P Hubs.

Nessa formulação o critério é Mini-Sum, o domínio da solução é um plano, a rede é completamente interconectada (de qualquer nó pode se chegar a outro), cada nó spoke é conectado a um único Hub. O número de Hubs a ser alocado é exógeno e pelo menos um e no máximo dois hubs podem ser atravessados na conexão entre um par origem-destino. O custo fixo de se criar um Hub não é considerado, a capacidade dos Hubs é ilimitada e as variáveis de decisão são binárias.

As entradas do modelo são semelhantes às entradas do P-PLH, acrescidas do fator N_i , que é o vetor de locação do nó spoke i . Além disso, as saídas do modelo são semelhantes às do P-PLH, acrescidas da variável de decisão P_k , que denota o vetor de locação do Hub k ($k = 1, \dots, p$). Considerando $d(a, b)$ como a distância euclidiana entre dois pontos a e b , o modelo tem a seguinte função objetivo definida pela equação [23].

$$MIN Z = \sum_i \sum_j \sum_k \sum_m h_{ij} Y_{ik} Y_{jm} \left(d(N_i, P_k) + \alpha d(P_k, P_m) + d(N_j, P_m) \right) \quad [23]$$

Sujeita as seguintes condições de contorno:

$$\sum_j Y_{ij} = 1 \forall i \quad [24]$$

$$P_k = (a_k, b_k) \forall k \in (1, p) \quad [25]$$

$$Y_{ij} \in \{0, 1\} \forall i, j \quad [26]$$

A equação [23] minimiza o custo total do transporte via Hub na rede. O primeiro termo da equação [23] representa o custo total de transporte do fluxo de origem nos spokes para seus respectivos Hubs. O segundo termo representa o custo de transporte do fluxo entre Hubs e o terceiro termo representa o custo do transporte dos Hubs para os spokes. A equação [24] limita que todo nó spoke i seja alocado a um único Hub. As equações [25] e [26] definem de qual tipo são as variáveis de decisão.

2.9 Multi Objetiva P-PLH

Em 2002, Costa, Captivo e Climaco [15] propuseram uma formulação P-PLH com múltipla função objetivo. No qual o primeiro objetivo é minimizar o custo total de transferência de fluxo (pessoas, mercadorias, dentre outros) na rede. O segundo objetivo é minimizar o máximo tempo que um Hub demora em processar o fluxo que passa por ele, isto é minimizar o tempo de serviço.

Nessa formulação, cada nó spoke é conectado a somente um Hub. O critério é Mini-Sum e Mini-Max, o domínio da solução é Rede, a rede é completamente interconectada (de qualquer nó pode-se chegar a um destino desejado), o número de Hubs a serem alocados é exógeno, e pelo menos um e no máximo dois Hubs podem ser atravessados, quando se conectarem um par origem-destino qualquer. O custo fixo de transformação de um nó em Hub não é considerado, os Hubs têm capacidade ilimitada e as variáveis de decisão são binárias.

Os inputs da formulação são semelhantes aos do P-PLH adicionando-se o fator T_k , que é o tempo que o Hub k demora a processar uma unidade de fluxo. Além disso, os outputs são similares aos do P-PLH. As funções objetivo são representadas pelas equações [27] e [28].

$$MIN Z = \sum_i \sum_j \sum_k \sum_m h_{ij} Y_{ik} Y_{jm} \left(d(N_i, P_k) + \alpha d(P_k, P_m) + d(N_j, P_m) \right) \quad [27]$$

$$MIN \max_k \{ T_k \sum_i \sum_j h_{ij} Y_{ik} + \sum_i \sum_j h_{ji} Y_{jm} Y_{ik} \} \quad [28]$$

Sujeitas as seguintes condições de contorno:

$$\sum_k Y_{ik} = 1 \forall i \quad [29]$$

$$\sum_k Y_{kk} = P \quad [30]$$

$$Y_{ik} - Y_{kk} \leq 0 \forall i, k \quad [31]$$

$$Y_{ik} \in \{0,1\} \forall i, k \quad [32]$$

A equação [27] minimiza o custo total de transporte na rede. A equação [28] minimiza o máximo tempo de serviço que um Hub k toma para processar o fluxo total que passa por ele. A equação [29] define que um dado nó spoke só pode ser conectado com um único Hub. A equação [30] garante que P Hubs vão ser alocados. A desigualdade [31] garante que um nó i só pode se ligar a um nó k , caso esse seja um Hub. A equação [32] define as variáveis de decisão como binárias.

2.10 Problema de Locação Central de P-Hub

Uma das mais importantes variações do Problema de Locação de Instalações é o Problema de Locação Central de P-Hub. Esse problema é muito útil, por exemplo, em locação de instalações de emergência. Definem que os pares origem-destino são pontos geradores de demanda para a formulação de Locação Central.

Nessa formulação o critério da função objetivo é Mini-Max, no qual o máximo custo dos pares origem-destino é minimizado. Originalmente, proposta por Campbell [12], em 1994, o problema de Locação Central é aplicável a situações nas quais envolvem transportes de produtos perecíveis na rede. As notações utilizadas são as mesmas da Múltipla Alocação P-PLH, exceto que o critério é Mini-Max. Além disso, a função objetivo é definida pela equação [33].

$$MIN \max_{i,j,k,m} \{ C_{ij}^{km} h_{ij} Z_{ij}^{km} \} \quad [33]$$

Sujeitas as seguintes condições de contorno:

$$\sum_k X_k = P \quad [34]$$

$$\sum_k \sum_m Z_{ij}^{km} = 1 \quad \forall i, j \quad [35]$$

$$Z_{ij}^{km} \leq X_m \quad \forall i, j, k, m \quad [36]$$

$$Z_{ij}^{km} \leq X_k \quad \forall i, j, k, m \quad [37]$$

$$Z_{ij}^{km} \geq 0 \quad \forall i, j, k, m \quad [38]$$

$$X_k \in \{0, 1\} \quad \forall k \quad [39]$$

A equação [33] minimiza o máximo custo de transporte entre pares de origem-destino. As equações [34], [35] e [39], assim como as desigualdades [36] à [38] são as mesmas da formulação Múltipla Alocação P-PLH. Campbell et al [16], em 2007, propôs melhorias na formulação do Problema de Locação Central. Ernest [17], em 2009, desenvolveu uma nova formulação do Problema de Locação Central que se demonstrou superior aos estudos iniciais de alocação central simples de P-Hub de Kara e Tensel [18], em 2000. Finalmente, Yaman e Elloumi [19] propuseram uma formulação “estrela” para o Problema de Locação Central, em 2012. A função objetivo, nesse caso, minimiza o comprimento da maior das conexões origem-destino. A maior aplicação prática dessa formulação reside na logística de transporte de materiais perecíveis.

2.11 Problema de Cobertura de Localização P-Hub

Essa formulação é uma extensão do problema clássico de localização de instalações de modo a cobrir uma determinada área. Esse modelo distribui Hubs de maneira que só há como haver conexões entre dois nós spokes se esses forem ligados via um ou um par de Hubs. De fato, só há conexão entre um par origem-destino se houver um ou mais Hubs, a pelo menos uma distância mínima preestabelecida. Por isso, o custo de transporte entre dois nós spokes, passando por um Hub, deve ser menor ou igual a um valor preestabelecido.

$$C_{ij}^{km} \leq \gamma_{ij} \quad [40]$$

Esse problema, inicialmente, formulado por Campbell [12], foi futuramente dividido em dois Problemas diferentes, Problema de Cobertura de Localização Set-Hub e Problema de

Cobertura Máxima de Localização, que vão ser detalhados a seguir. Posteriormente, Kara e Tansel [20], em 2003; e Wagner [21], em 2008, propuseram uma nova formulação matemática para alocação simples (um único Hub) para o Problema de Cobertura com os comprimentos das conexões limitados.

2.12 Problema de Cobertura de Localização Set-Hub

Essa formulação é uma extensão particular do Problema de Cobertura, a qual é similar à Múltipla Alocação P-PLH com algumas exceções. Antes de se resolver o problema o número de Hubs não é conhecido. Conseqüentemente, o custo fixo atrelado à instalação de um Hub deve ser considerado.

As entradas desse problema são:

- F_k , o custo fixo devido à instalação de um Hub em um dado nó k ;
- C_{ij}^{km} , o custo relativo à conexão (transferência de pessoas, carga, dentre outros) entre os nós i e j , via hubs k e m ;
- γ_{ij} , refere-se ao máximo custo permitido para a cobertura de demanda (conexões) entre os nós i e j ;
- V_{ij}^{km} , variável binária com valor unitário se os Hubs instalados em k e m são responsáveis pela transferência da demanda entre os pares (i, j) , e tem valor nulo em caso contrário.

As saídas do modelo são semelhantes à da formulação Múltipla Alocação P-PLH. A função objetivo é representada pela equação [41].

$$MIN Z = \sum_k F_k X_k \quad [41]$$

Sujeita as seguintes condições de contorno:

$$\sum_k \sum_m Z_{ij}^{km} \geq 1 \quad \forall i, j \quad [42]$$

$$Z_{ij}^{km} \leq X_m \quad \forall i, j, k, m \quad [43]$$

$$Z_{ij}^{km} \leq X_k \quad \forall i, j, k, m \quad [44]$$

$$Z_{ij}^{km} \geq 0 \forall i, j, k, m \quad [45]$$

$$X_k \in \{0,1\} \forall k \quad [46]$$

A equação [41] minimiza o custo total de abertura de novas instalações tipo Hub. A desigualdade [42] limita que cada par gerador de demanda deve ser coberto por pelo menos uma vez por um par de Hubs. As outras condições de contorno são similares às da formulação Múltipla Alocação P-PLH, já citada na Seção 2.4.

2.13 Problema de Cobertura Máxima de Localização

Essa formulação é uma extensão particular do Problema de Cobertura, a qual é similar à Múltipla Alocação P-PLH, uma vez que o número de Hubs é conhecido previamente (exógeno). Além disso, o custo fixo de se instalar um Hub não é considerado. A função objetivo é representada pela equação [47].

$$MAX Z = \sum_i \sum_j \sum_k \sum_m h_{ij} V_{ij}^{km} Z_{ij}^{km} \quad [47]$$

Sujeita as seguintes condições de contorno:

$$\sum_k X_k = P \quad [48]$$

$$\sum_k \sum_m Z_{ij}^{km} = 1 \forall i, j \quad [49]$$

$$Z_{ij}^{km} \leq X_m \forall i, j, k, m \quad [50]$$

$$Z_{ij}^{km} \leq X_k \forall i, j, k, m \quad [51]$$

$$Z_{ij}^{km} \geq 0 \forall i, j, k, m \quad [52]$$

$$X_k \in \{0,1\} \forall k \quad [53]$$

A equação [47] maximiza a quantidade de demanda coberta pela rede. As outras equações são similares às da formulação Múltipla Alocação de Hub. Essa formulação tem aplicação prática na localização de instalações de uso comum da população, hospitais públicos, por exemplo.

2.14 Aplicações

As formulações propostas anteriormente já foram aplicadas em várias situações, onde o conceito de Hub foi utilizado, convenientemente, com as particularidades do problema a ser resolvido. A Tabela 3 fornece alguns exemplos de áreas de aplicação do conceito (indústria), os casos onde os conceitos de Hubs foram aplicados, o lugar, e o estudo publicado que serviu de referência na aplicação dos conceitos.

Tabela 3: Tabela onde indica o problema selecionado, a área onde o conceito foi aplicado, o lugar e o estudo que serviu de referência.

Área de aplicação	Problema	Lugar (ano)	Artigo
Transporte aéreo	Sistema de entrega de cargas	(2000)	Kara e Tansel [18]
Transporte aéreo	Companhia aérea	21 aeroportos do Oriente médio (2005)	Alder e Hashai [22]
Transporte aéreo	Tráfego de passageiros	Estados Unidos (2005)	Campbell, Ernest e Krishnamoorthy [23]
Transporte aéreo	Planejamento de Rotas	Taiwan e China (2009)	Yang [24]
Transporte aéreo	Localização de fluxo aéreo de fretes	China (2009)	Qu e Weng [25]
Transporte aéreo	Localização de aeroporto Hub (turístico)	Brasil (2010)	Costa, Lohmann e Oliveira [26]
Transporte aéreo	Localização de Centro multimodal de carga	Aeroporto de Marrocos (2010)	Menou, Benallou, Lahdelma e Salminen [27]
Transporte aéreo	Localização de Aeroporto Hub – Turismo e industrial	37 cidades no Irã (2011)	Karimi e Bashiri [28]
Transporte aéreo	Rede de transporte de carga	China (2012)	Lin et al. [29]
Correios (sistema de entrega rápida)	Serviço Postal	Turquia (2010)	Centiner at al. [30]
Gerenciamento de sistema Logístico	Transporte (Frete)	Hong Kong (2010)	Wang e Cheng [31]
Gerenciamento de sistema Logístico	Frete (fluxo)	Estados Unidos (2010)	Ishfaq e Sox [32]
Gerenciamento de sistema Logístico	Sistema de transporte terrestre	25 cidades nos Estados Unidos (2012)	Ishfaq e Sox [32]
Sistema de Transporte	Localização de porto Hub	Regiões costeiras da América do Sul (2005)	Aversa, Botter, Haralambides e Yoshizake [33]
Sistema de Transporte	Companhias de Caminhão	Brasil (2007)	Cunha e Silva [34]
Sistema de Transporte	Implantação de aterros	Brunswick, Canada (2007)	Eiselt [35]
Sistema de Transporte	Transporte de Carga em Containers	Hub asiático (trecho Los Angeles e Rotterdam) - 2009	Takano e Arai [36]

Área de aplicação	Problema	Lugar (ano)	Artigo
Sistema de Transporte	Transporte via Caminhão	América do Norte (2009)	Campbell [37]
Sistema de Transporte	Transporte Multimodal	Terminal de transferência Europeu (2009)	Limbourg e Jourquin [38]
Sistema de Transporte	Localização de Hub de transporte por Container	Sudeste Asiático (2010)	Chou [39]
Sistema de Transporte	Indústria de frete (via caminhão)	Taiwan (2010)	Lin e Lee [40]
Sistema de Transporte	Transporte de carga	Servia (2011)	Vidovic et al. [40]
Sistema de Transporte	Rede intermodal de carga	Brasil (2009)	Vasconcelos et al. [42]

De acordo com a Tabela 3, a maioria dos estudos é relacionada a Transporte Aéreo e Sistemas de Transporte. A diferença entre essas duas indústrias reside no fato que a primeira foi uma das motivadoras do desenvolvimento das Teorias relacionadas à Localização de Hubs, enquanto que a segunda tem sido tema mais frequente nos últimos oito anos (76% dos estudos em rede de transportes). Percebe-se, também, analisando a Tabela 3 que a maioria das aplicações, em casos reais, dos conceitos de Hub foi feita nos últimos dez anos.

3 ANÁLISE EMPÍRICA

Após a análise dos referenciais teóricos, havia a necessidade de definir uma formulação a ser adotada ou de fazer modificações em uma já existente, de modo a adaptá-la a realidade do vigente projeto.

Além disso, com a formulação definida, era necessário determinar um padrão de análise para os resultados obtidos, de modo que a análise não só retratasse um resultado onde se alcançou a solução ótima, mas sim, algo aplicável na prática.

3.1 Escolha da Formulação Matemática

A maioria das formulações matemáticas detalhadas no capítulo 2 determinaram uma função objetivo que minimizava os custos de transporte via as conexões definidas na rede. Algumas formulações também levavam em conta os custos fixos de se implantar um Hub (fazendo um paralelo ao Transporte Aéreo, é o custo associado a todas as mudanças que devem ocorrer na infraestrutura e no administrativo do aeroporto, de modo que esse possa operar como um concentrador de fluxo).

Os custos de transporte aéreo de pessoas e cargas foram especificados na Figura 1. Como foi comentado, o combustível é o responsável pelo maior percentual de custos associados ao transporte aéreo (37,3% do total, em 2013). Não havia disponível nenhuma informação específica de gasto de combustível para as rotas nacionais e internacionais. Além disso, tem-se que parte do combustível gasto depende também do tempo de permanência em táxi e também das distâncias percorridas em solo, não só da rota de tráfego. Todavia, sabe-se que a distância percorrida pela aeronave em voo é proporcional ao seu gasto de combustível, ou seja, quanto menor for a distância de cruzeiro total percorrida por todas as aeronaves de uma dada companhia aérea, menor será o gasto com combustível. Há ainda muito outros gastos associados à implantação de um Hub; todavia, para estimá-los, há a necessidade de um detalhamento das estruturas de custos das companhias aéreas e/ou de muitas premissas a respeito. Não foram estimados os custos fixos relacionados com a transformação de cada aeroporto nacional em um Hub, pois para isso deveria se conhecer a operação e as limitações para receber voos internacionais em cada aeroporto, fugindo do escopo do projeto. Dado esses fatos, a função

objetivo adotada nesse projeto vai minimizar a distância total percorrida por aeronaves em determinadas rotas, pois vai refletir os custos de combustíveis, que são os mais representativos na estrutura de custos das companhias aéreas.

Quanto às condições de contorno, como visto no Capítulo anterior, os estudos publicados sobre alocação de Hubs tinham as mais variadas restrições, de modo adaptar a formulação a certos tipos de problemas específicos. No caso desse projeto, as condições de contorno foram escolhidas de forma a permitir que na rede se instalem um ou mais Hubs, que cada aeroporto só possa se conectar com um Hub antes do destino final, que a rede esteja completamente conectada (de qualquer aeroporto de origem no Brasil, pode-se chegar a um aeroporto internacional de destino). Além disso, consideraram-se as variáveis de decisão como binárias.

Ao final, foi esboçada uma formulação semelhante a P-PLH, todavia com minimização do somatório do produto das distâncias de cada conexão estabelecida pelo número total de voos nesse trecho. Além disso, outra diferença em relação à formulação P-PLH é que não é permitida a ligação entre um aeroporto spoke com dois Hubs domésticos antes de alcançar o destino final.

Tem-se que h_{ij} é o fluxo de voos entre os aeroportos i e j , d_{ij} é a distância de rota entre os aeroportos i e j e Y_{ij} são as variáveis de decisão. As variáveis Y_{ij} são unitárias se o aeroporto i estiver ligado ao aeroporto Hub j e são nulas, caso contrário. Assim, tem-se que a função objetivo da formulação a ser utilizada no projeto é representada pela equação [54].

$$MIN Z = \sum_i \sum_j \sum_k h_{ik} (d_{ij} + d_{jk}) Y_{ij} Y_{ji} \quad [54]$$

A formulação está sujeita as seguintes condições de contorno:

$$\sum_j Y_{ij} = 1 \quad [55]$$

$$\sum_j Y_{jj} = P \quad [56]$$

$$Y_{ij} - Y_{jj} \leq 0 \quad \forall i, j \quad [57]$$

$$Y_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \quad [58]$$

A função objetivo minimiza o somatório dos produtos das distâncias de rotas pelo número de voos naquelas rotas. A equação [55] garante que um aeroporto spoke i só pode se ligar a um único aeroporto Hub j . A equação [56] estipula que exatos P Hubs serão alocados

(o valor de P vai variar conforme a análise que se deseja fazer). A desigualdade [57] garante que um aeroporto i só pode ser conectado a um aeroporto j , caso j seja Hub daquela rota. A equação [58] define que as variáveis de decisão são binárias.

A equação [54] ainda pôde ser linearizada, como foi feito na equação [5].

$$\begin{aligned} \sum_i \sum_j \sum_k h_{ik} (d_{ij} + d_{jk}) Y_{ij} Y_{ji} &= \sum_i \sum_j d_{ij} Y_{ij} \sum_k h_{ik} + \sum_j \sum_i d_{ji} Y_{ij} \sum_k h_{ki} = \\ &= \sum_i \sum_j d_{ji} Y_{ij} (O_i + D_i) \end{aligned} \quad [59]$$

Em que O_i e D_i são os fluxos de voos de entrada e saída de um dado aeroporto i , respectivamente.

3.2 Dados

Os dados utilizados para se obter o fluxo de voos internacionais para as mais diversas rotas com destino ou origem no Brasil foram retirados da base de Voo Regular Ativo da ANAC [43]. Foi calculada a média de voos dos últimos 12 meses, de modo a eliminar possíveis sazonalidades. A Tabela 4 apresenta o fluxo mensal de voos que saem do Brasil com destino na Europa.

Tabela 4: Tabela com o fluxo mensal de voos com destino na Europa.

País de Destino	Cidade de Origem	Número de Voos
Alemanha	Guarulhos	89
Alemanha	Rio De Janeiro	27
Alemanha	Salvador	4
Alemanha	Recife	4
Alemanha	Fortaleza	5
Espanha	Guarulhos	124
Espanha	Rio De Janeiro	28
Espanha	Salvador	14
Espanha	Recife	1
França	Guarulhos	89
França	Rio De Janeiro	56
França	Brasília	13
Holanda	Guarulhos	31
Holanda	Rio De Janeiro	23
Itália	Guarulhos	76

País de Destino	Cidade de Origem	Número de Voos
Itália	Rio De Janeiro	31
Portugal	Guarulhos	57
Portugal	Rio De Janeiro	53
Portugal	Brasília	30
Portugal	Campinas	9
Portugal	Confins	23
Portugal	Salvador	30
Portugal	Porto Alegre	18
Portugal	Recife	28
Portugal	Fortaleza	31
Reino Unido	Guarulhos	75
Reino Unido	Rio De Janeiro	31
Suíça	Guarulhos	46
Turquia	Guarulhos	31

Foram tabelados, também, os números de voos no fluxo contrário, ou seja, com os destinos sendo as cidades brasileiras e a origem sendo os países europeus. O mesmo processo foi repetido para os demais países da América do Norte, os quais possuem voos com conexão, origem ou destino no Brasil.

Todavia, necessitava-se saber qual era a origem doméstica desses passageiros, a fim de mapear a malha corrente do Brasil para cada rota internacional. Por exemplo, no caso da Suíça, com 46 voos que saíam de Guarulhos, era necessário saber quantos passageiros eram realmente originários de Guarulhos e quantos fizeram conexão em Guarulhos com destino à Suíça com origem em outro aeroporto doméstico. A informação das conexões de cada passageiro não é algo elementar de se encontrar e, provavelmente, é um dado reservado de cada companhia aérea. Assim, tomou-se a premissa, já citada na Seção 1.4, de que o interesse de voo internacional de cada aeroporto é proporcional a sua fatia de voos domésticos. A Tabela 5, exemplifica a premissa adotada para o caso dos voos para Alemanha.

Tabela 5: Tabela com o fluxo de voos mensais com a Alemanha como destino e com o interesse de voos de cada aeroporto doméstico.

País de Destino	Cidade de Origem	% de interesse em voos internacionais	Número de voos esperados (interesse por voos)	Número de voos real
Alemanha	GUARULHOS	26%	30	89
Alemanha	RIO DE JANEIRO	15%	17	27
Alemanha	BRASÍLIA	12%	14	0
Alemanha	CAMPINAS	10%	12	0

País de Destino	Cidade de Origem	% de interesse em voos internacionais	Número de voos esperados (interesse por voos)	Número de voos real
Alemanha	CONFINS	9%	10	0
Alemanha	SALVADOR	7%	8	4
Alemanha	PORTO ALEGRE	5%	6	0
Alemanha	RECIFE	5%	6	4
Alemanha	FORTALEZA	5%	6	5
Alemanha	MANAUS	3%	3	0
Alemanha	FLORIANÓPOLIS	3%	3	0

Analisando a Tabela 5, temos, por exemplo, que o Aeroporto de Brasília não possui nenhum voo direto para Alemanha, todavia os passageiros que saem dele com conexão nos outros aeroportos nacionais (SBGR ou SBGL) são suficientes para ocupar 14 voos mensais diretos para Alemanha. Foi feita essa premissa para cada rota internacional com destino ou origem sendo os aeroportos brasileiros. Assim, temos o interesse de voo a partir dos principais aeroportos brasileiros para cada um dos destinos Europeus e da América do Norte.

Os dados referentes à distância de rota de cada aeroporto brasileiro para os respectivos destinos internacionais e para as possíveis conexões domésticas foram extraídos de um software online Great Circle Mapper [44], o qual fornecia a distância entre dois aeroportos quaisquer. A Tabela 6 é um exemplo dos valores tabelados, para o caso da Alemanha.

Tabela 6: Tabela com as distâncias de rota, em quilômetros, entre os aeroportos nacionais, e entre os aeroportos nacionais e o Aeroporto de Frankfurt (EDDF).

Aeroporto	SBGR	SBGL	SBBR	SBKP	SBCF	SBBV	SBPA	SBRF	SBFZ	SBEG	EDDF
SBGR	0	337	851	83	495	1449	864	2095	2337	2689	9774
SBGL	337	0	911	399	361	1214	1121	1853	2166	2841	9544
SBBR	851	911	0	794	590	1086	1599	1653	1687	1944	9148
SBKP	83	399	794	0	498	1455	872	2101	2321	2612	9770
SBCF	495	361	590	498	0	957	1359	1603	1850	2534	9279
SBSV	1449	1214	1086	1455	957	0	2309	647	1010	2629	8334
SBPA	864	1121	1599	872	1359	2309	0	2955	3193	3127	10638
SBRF	2095	1853	1653	2101	1603	647	2955	0	625	2839	7691
SBFZ	2337	2166	1687	2321	1850	1010	3193	625	0	2392	7470
SBEG	2689	2841	1944	2612	2534	2629	3127	2839	2392	0	8761
EDDF	514	758	1308	536	1006	1950	363	2596	2850	2987	0

Analisando a Tabela 6, temos as distâncias de rota entre quaisquer aeroportos nacionais e as distâncias de rota de cada aeroporto nacional para o Aeroporto Internacional de Frankfurt. Com o auxílio dos valores tabelados, pode-se também calcular a distância total viajada com conexões entre aeroportos. Tabelas semelhantes foram montadas para os demais destinos internacionais.

3.3 Análises

Primeiramente, foi feito um agrupamento entre rotas, dividindo-as em dois agrupamentos principais:

- Agrupamento Europa;
- Agrupamento América do Norte;

O primeiro agrupamento contém as rotas de cada cidade brasileira com destino a um país Europeu e as rotas de retorno. O segundo agrupamento contém as rotas de cada cidade brasileira com destino a um país da América do Norte e as rotas de retorno. Foi feita essa escolha pela semelhança de perfil de passageiro e distâncias de rotas nos países componentes de cada agrupamento. Além disso, pode-se alocar uma rede com Hubs diferentes para cada continente. Caso fosse feita uma única otimização para todas as rotas internacionais, perderíamos a sensibilidade de análise, visto que resultados melhores e maior versatilidade de conexões podem ser alcançados analisando cada agrupamento separadamente. Além disso, analisando-se toda a malha aérea de uma única vez, gera-se um grande esforço computacional, devido à grande complexidade do problema.

As análises foram divididas em três partes:

- Adicionando-se mais um Hub na malha atual, com SBGR e SBGL sendo Hubs fixos preestabelecidos;
- Não se fixou SBGL como Hub na malha e aplicou-se a otimização, identificando quais os outros dois Hubs seriam alocados junto com SBGR;
- Não se fixaram SBGL e SBGR como Hubs e aplicou-se a otimização total da malha, identificando quais seriam os três Hubs alocados na rede ótima.

Foi feita a análise dessa maneira, pois é mais condizente com uma possível aplicação prática do projeto, já que a primeira parte analisa a inserção de um novo Hub mantendo os atuais, o que não desperdiçaria as capacidades que SBGL e SGBR já possuem como concentradores de fluxo. Em seguida, analisou-se o impacto de uma possível realocação do segundo maior Hub nacional. Por último, verificou-se o impacto de uma completa otimização da malha. Fazendo as análises dessa maneira, é possível verificar o impacto de mudar a malha aérea brasileira de forma gradual e verificar se a mudança nas alocações de Hub para certos

destinos é ou não viável. Dessa forma, caso a variação de custos associados a instalações de novas rotas seja pequena, talvez não seja viável toda a mudança operacional necessária para se alocar as rotas, pois outros custos associados podem ser mais representativos.

3.4 Solução Computacional

Para se gerar os resultados, foi criada uma rotina a partir de uma Heurística para se obter a solução ótima dada a formulação escolhida, representada pela equação [54]. Para se obter a malha corrente brasileira para todas as rotas internacionais foi tomada as premissas já comentadas na Seção 1.4. Analisando novamente a Tabela 2, temos que na malha corrente existem nove aeroportos domésticos que fazem conexões nos dois principais Hubs (SBGR e SBGL), já que os demais aeroportos foram desconsiderados por ter uma fatia pequena dos voos domésticos. As variáveis de decisão do modelo foram inseridas numa matriz 11x11. A Figura 5 contém um exemplo de resultado (variáveis de decisão) da rotina de otimização, que foi feita para calibrar o modelo. No caso, só é considerada a rota Alemanha-Brasil.

Origem/Conexão	Hub location (ALEMANHA)											
	GUARULHOS	RIO DE JANEIRO	BRASÍLIA	CAMPINAS	CONFINES	SALVADOR	PORTO ALEGRE	RECIFE	FORTALEZA	MANAUS	FLORIANÓPOLIS	Soma
GUARULHOS	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
RIO DE JANEIRO	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
BRASÍLIA	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
CAMPINAS	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
CONFINES	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
SALVADOR	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
PORTO ALEGRE	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
RECIFE	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
FORTALEZA	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
MANAUS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
FLORIANÓPOLIS	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1

Figura 5: Variáveis de decisão fornecidas pela Heurística, rota Alemanha-Brasil.

Neste exemplo, foi feita uma otimização da rede de modo a alocar os três melhores Hubs possíveis para essa rota. As variáveis de decisão Y_{ij} são do tipo binárias, com valor unitário se o aeroporto i se liga com o aeroporto Hub j . Analisando a Figura 5, verifica-se que os três Hubs selecionados para a rede são Recife, Fortaleza e Manaus. Também é possível verificar todas as conexões dos demais aeroportos domésticos com esses aeroportos. Os voos com origem em Guarulhos, Rio de Janeiro, Confins, Salvador, Porto Alegre e Florianópolis devem fazer

conexões por Recife antes de ir para Alemanha; os voos com origem em Brasília e Campinas devem fazer conexões por Fortaleza antes de ir para Alemanha; no caso de Manaus, somente os próprios voos com origem lá vão direto para a Alemanha. A coluna soma, é referente à condição de contorno que garante que cada aeroporto só poderá ser ligado a um único Hub.

Para resolver o problema de otimização, inicialmente tentou-se utilizar o otimizador do Microsoft Excel, chamado Solver. Contudo, o Solver tem limitações de variáveis, conseguindo operar com, no máximo, 200 variáveis. O agrupamento europeu tem nove países de destino, contabilizando assim 1089 variáveis de decisão. Ou seja, não seria possível executar o programa para o agrupamento completo.

A segunda tentativa foi rodar as rotas de cada agrupamento separadamente no Solver. Todavia, apesar de suportar 200 variáveis, o Solver perde a precisão e muitas vezes não consegue alcançar os ótimos globais quando se coloca um número alto de variáveis. Como cada rota possui 121 variáveis de decisão, o Solver não conseguiu gerar resultados satisfatórios para essa análise.

Foi feita uma terceira tentativa de se utilizar o Solver. Desta vez, tentou-se resolver o problema fixando como Hubs os aeroportos de Guarulhos e do Rio de Janeiro, ou seja, o problema era solucionar a alocação de apenas um Hub. Foram criados três grupos dentro dos aeroportos nacionais para solucionar o problema em cada grupo e depois agrupar os resultados. O primeiro era formado por Guarulhos, Rio de Janeiro, Brasília, Campinas e Confins. O segundo era formado por Guarulhos, Rio de Janeiro, Salvador, Porto Alegre e Recife. O terceiro era formado por Guarulhos, Rio de Janeiro, Fortaleza, Manaus e Florianópolis. Executava-se o Solver para cada grupo, obtendo um Hub “vencedor” por grupo, para ser alocado junto com os hubs SBGR e SBGL. Na sequência, era feita a otimização no Solver com SBGR, SBGL e os três “vencedores” de cada grupo. Assim, tinha-se ao final o melhor Hub a ser alocado para cada rota.

Essa análise tinha uma série de desvantagens. Primeiramente, só se podia adicionar um novo Hub a rede, não se podia fazer uma otimização da malha sem fixar SBGL ou sem fixar SBGL e SBGR, simultaneamente. Segundo, para cada rota era necessário fazer quatro execuções para obtenção da solução ótima. Somente no agrupamento Europa seria necessário utilizar o Solver por 36 vezes. Outra limitação é que os resultados fornecidos pelo Solver são dependentes do valor inicial que se atribui as variáveis de decisão, ou seja, depois de todas as tentativas de obtenção da solução ótima, não era garantida a obtenção de um mínimo global,

visto que a solução poderia ter sido alcançada em um mínimo local, atendendo aos critérios de parada do Solver.

Uma quarta tentativa de resolver o problema seria por exaustão, criando-se todas as soluções possíveis (matrizes 11x11) e testando-as para obter o resultado ótimo. A primeira vista para cada rota seriam 2^{121} combinações possíveis, um número na ordem de 10^{36} . É inviável se obter uma solução computacional por exaustão para um problema com essa complexidade. Todavia, foi observado que uma solução que satisfaz as condições de contorno deve possuir somente três colunas da matriz das variáveis de decisão com valores não nulos simultaneamente, e cada linha só pode ter um valor diferente de 0. Adicionando essas condições de contorno, para o caso de só se adicionar um único Hub à rede, tinha-se para cada rota um problema com $\binom{9}{1} * 3^9 = 177147$ possíveis combinações. Para o caso de não se fixar SBGL como Hub e otimizar a malha, tinha-se para cada rota $\binom{10}{2} * 3^{10} = 2657205$ possíveis combinações. Para o caso de não se fixar nem SBGR e nem SBGL e otimizar a malha total, tinha-se para cada rota $\binom{11}{3} * 3^{11} = 29229255$ possíveis combinações. Com essa tática de resolução, era possível gerar resultados para os três tipos de análises desejadas. No primeiro caso, o computador demorava cerca de 25 minutos para gerar os resultados; no segundo, cerca de 4 horas; no terceiro, cerca de 32 horas. A análise foi feita para cada rota separadamente, já que o tempo de execução seria inviável para o agrupamento total.

Na quinta tentativa de resolver o problema, foi criada uma Heurística utilizando as condições de contorno do problema para diminuir o número de testes. Depois, testou-se a Heurística proposta com a solução por exaustão, chegando aos mesmos resultados. Basicamente, dava-se um palpite inicial para a combinação de três Hubs, a partir desse palpite gerava-se a solução ótima para aqueles três Hubs, salvando o resultado. Na sequência, mudava-se um dos Hubs e calculava-se o resultado ótimo para a nova combinação. Ao final, comparava-se com o anterior; se fosse melhor, guardava-se esse resultado. A lógica da programação está ilustrada nas Figuras 6 a 8. As figuras apresentam a otimização para uma única rota, Brasil-Alemanha.

Origem/Conexão	GUARULHOS	RIO DE JANEIRO	BRASÍLIA
GUARULHOS	1	0	0
RIO DE JANEIRO	1	0	0
BRASÍLIA	1	0	0
CAMPINAS	1	0	0
CONFINS	1	0	0
SALVADOR	1	0	0
PORTO ALEGRE	1	0	0
RECIFE	1	0	0
FORTALEZA	1	0	0
MANAUS	1	0	0
FLORIANÓPOLIS	1	0	0

Figura 6: Palpite inicial para iniciar a rotina da Heurística.

Na Figura 6, vemos que foram selecionados três possíveis candidatos a Hub: Guarulhos, Rio de Janeiro e Brasília. O palpite inicial considera que todos os voos fazem escala em um único Hub, no caso Guarulhos, a partir daí varia-se o valor da variável de decisão Y_{ij} por linha, ou seja, testa-se para cada origem qual a melhor conexão dado os três Hubs selecionados. O valor das distâncias era calculado numa matriz auxiliar de distâncias, representada pela Figura 7. Ou seja, dada uma origem calculava-se o produto da distância de rota pelo número de voos, para cada uma das três possíveis conexões, de modo a escolher a menor distância total a partir de cada cidade de origem. Quando, passava-se por todas as linhas, somava-se o valor da matriz auxiliar de distâncias, para saber qual o valor total das distâncias atravessadas por todos os voos naquela rede. Esse valor representava a menor distância possível de rota para aqueles três Hubs. Guardava-se esse valor. A Figura 8 representa essa combinação.

Origem/Conexão	GUARULHOS	RIO DE JANEIRO	BRASÍLIA
GUARULHOS	654395	0	0
RIO DE JANEIRO	0	363391	0
BRASÍLIA	0	0	287127
CAMPINAS	0	0	266613
CONFINS	0	0	232895
SALVADOR	0	0	186004
PORTO ALEGRE	0	149769	0
RECIFE	0	0	145234
FORTALEZA	0	0	133633
MANAUS	0	0	80833
FLORIANÓPOLIS	77847	0	0

Figura 7: Matriz auxiliar que calcula as distâncias de rota.

Origem/Conexão	GUARULHOS	RIO DE JANEIRO	BRASÍLIA
GUARULHOS	1	0	0
RIO DE JANEIRO	0	1	0
BRASÍLIA	0	0	1
CAMPINAS	0	0	1
CONFINS	0	0	1
SALVADOR	0	0	1
PORTO ALEGRE	0	1	0
RECIFE	0	0	1
FORTALEZA	0	0	1
MANAUS	0	0	1
FLORIANÓPOLIS	1	0	0

Figura 8: Rota fornecida para os três Hubs considerados no primeiro loop da Heurística.

Na matriz da Figura 7, o valor não nulo de cada linha representa o produto da distância de rota (dada em quilômetros) pelo número de voos para cada cidade de origem, ou seja, o somatório da distância viajada por todos os voos. Na Figura 8, vemos qual a melhor mapa de rotas, caso aqueles três Hubs sejam alocados.

Agora, a segunda parte do problema é variar um dos Hubs e realizar o mesmo processamento. Ao final, comparava-se o novo resultado com valor obtido com os três Hubs anteriores. Caso fosse melhor, gravava-se esse novo valor, continuava-se variando os Hubs até todas as combinações possíveis fossem testadas. Percebe-se que dado três Hubs, o número de testes para cada combinação era igual a $(N^{\circ} \text{ de Hubs}) * (N^{\circ} \text{ de possíveis cidades de origem}) = 3 * 11 = 33$ e, para se passar por todos os Hubs possíveis, eram necessárias $\binom{11}{3} = 165$ combinações. Logo, para otimizar uma malha sem fixar nenhum Hub, eram testadas $165 * 33 = 5445$ combinações. Anteriormente, quando o problema foi abordado tentando testar todas as soluções possíveis, o número de testes necessários era 29.229.255. Assim, com essa lógica de programação em VBA, pôde-se diminuir drasticamente o número de testes e, por consequência, o esforço computacional. Além disso, quando comparados os valores obtidos com a Heurística com os da solução por exaustão, tinham-se os mesmos resultados. No caso da solução por exaustão, pode-se garantir que se chegou a um mínimo global. O tempo necessário para gerar os resultados de uma rota qualquer era cerca de 2,5 minutos. Quando foi feita a otimização de todo o agrupamento de uma só vez, foram necessários cerca de 22,5 minutos.

A Figura 9 apresenta o pseudocódigo da programação para o caso da otimização da malha para três Hubs, não fixando nenhum Hub.

```

Sub otimizar3() {
  For l = 1 To 9
    hub1 = l
    For k = l + 1 To 10
      hub2 = k
      For j = k + 1 To 11
        hub3 = j
        Criar a matriz com 11x3, onde as linhas são as cidades
        e as colunas representam os Hub e são as colunas l, k e j.
        Zerar matriz 11x3
        Fazer todos os termos da coluna l da matriz 11x3 receber 1.
        For a = 1 To 11
          For i = 1 To 3
            Zerar o termo com 1 da linha i.
            Fazer o termo da próxima coluna, com a linha i, receber 1.
            Testa se diminui o somatório da matriz de distâncias.
            Caso negativo, desfaz a mudança.
          Next i
        Next a
        aux = Somatório da matriz distâncias.
        Testar se aux < Melhor resultado já alcançado.
        Caso positivo, salvar o resultado.
      Next j
    Next k
  Next l
}

```

Figura 9: Pseudocódigo da otimização para três Hubs.

Pela Figura 9, percebe-se que para fixar algum Hub, basta eliminar um dos loops. Para fixar SBGR, basta fazer hub1 receber o valor da coluna que representa o aeroporto SBGR e não a variar. O mesmo vale para fixar o aeroporto SBGL como Hub ou os dois ao mesmo tempo. Essa lógica de programação permitiu sem muito esforço computacional gerar os resultados desejados. Para alocar mais Hubs, a lógica continua a mesma, com adição de mais loops.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo será dividido em três partes com a exposição dos resultados e discussões para os dois agrupamentos, e uma estimativa da economia de combustível para as redes propostas.

4.1 Agrupamento Europa

O agrupamento europeu era composto por nove países com rotas brasileiras de destino ou origem. Alguns países europeus possuíam mais de um aeroporto que comportavam voos com origem no Brasil. Para esses casos foi feita a consideração de um único aeroporto no país, realocando os voos para o aeroporto que possuía o maior fluxo de voos.

Atualmente, a malha aérea para a Europa tem os números de voos mensais, rotas e distâncias de rota conforme Tabela 7.

Tabela 7: Tabela com o número de voos e distância de rota para todos os pares origem-destino do agrupamento Europa.

Rota	Número de Voos	Distância de rota (km)
Alemanha – Guarulhos	180	9774
Alemanha - Rio de Janeiro	54	9544
Alemanha – Salvador	8	8334
Alemanha - Recife	8	7691
Alemanha - Fortaleza	10	7470
Espanha - Guarulhos	248	8356
Espanha - Rio de Janeiro	56	8124
Espanha - Salvador	28	6914
Espanha - Recife	1	6271
Espanha - Fortaleza	1	6059
França - Guarulhos	179	9382
França - Rio de Janeiro	112	9160
França - Brasília	26	8737
Holanda - Guarulhos	61	9751
Holanda - Rio de Janeiro	47	9536
Itália - Guarulhos	152	9415
Itália - Rio de Janeiro	62	9153
Portugal - Guarulhos	114	7911
Portugal - Rio de Janeiro	105	7690
Portugal - Brasília	60	7274
Portugal - Campinas	18	7904

Rota	Número de Voos	Distância de rota (km)
Portugal - Confins	45	7416
Portugal - Salvador	60	6477
Portugal - Porto Alegre	36	8774
Portugal - Recife	56	5839
Portugal - Fortaleza	62	5598
Portugal - Manaus	14	6972
Reino Unido - Guarulhos	149	9435
Reino Unido - Rio de Janeiro	63	9228
Suíça - Guarulhos	92	9588
Turquia - Guarulhos	62	10536

Analisando a malha aérea da Tabela 7, pode-se calcular a distância total atravessada por todos os voos nessa rede. Considerando somente os voos concentrados em SBGR e SBGL, temos que a distância total atravessada por todos os voos é 15.780.606 km. Para saber as origens dos voos que são atualmente concentrados em Guarulhos e Rio de Janeiro, usou-se a premissa apresentada na Seção 3.2, na qual se considera que a origem dos passageiros é proporcional à fatia de voos domésticos dos aeroportos nacionais de origem. Revendo a Tabela 5, pode-se ver um exemplo dessa premissa para rota Brasil-Alemanha.

Foi executada a heurística somente para otimização dos voos que são concentrados atualmente em SBGR e SBGL (1736 voos no total), ou seja, os demais 433 voos que não são operados via rotas com os Hubs SBGR e SBGL continuarão a operar por seus respectivos aeroportos atuais. A otimização foi feita segundo a equação [59] e suas respectivas condições de contorno.

4.1.1 Análise 1: agrupamento Europa

Primeiramente, fixaram-se os Hubs SBGR e SBGL, e adicionou-se um novo Hub na rede, para avaliar qual seria o impacto na distância total viajada na nova configuração de rede. A rotina de otimização forneceu como novo Hub o Aeroporto de Fortaleza (SBFZ), as conexões estão representadas na Figura 10, que mostra as variáveis de decisão do problema.

Origem/Conexão	Hub location (Cluster Europa)											Soma
	GUARULHOS	RIO DE JANEIRO	BRASÍLIA	CAMPINAS	CONFINS	SALVADOR	PORTO ALEGRE	RECIFE	FORTALEZA	MANAUS	FLORIANÓPOLIS	
GUARULHOS	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
RIO DE JANEIRO	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
BRASÍLIA	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
CAMPINAS	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
CONFINS	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
SALVADOR	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
PORTO ALEGRE	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
RECIFE	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
FORTALEZA	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
MANAUS	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
FLORIANÓPOLIS	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Figura 10: Matriz das variáveis de decisão fornecida pela Heurística, fixando SBGR e SBGL como Hubs, para o agrupamento Europa.

Pela Figura 10, pode-se perceber que se ao adicionar mais um Hub na malha corrente, deixando fixados os aeroportos de Guarulhos e do Galeão, o novo Hub alocado na rede será o aeroporto de Fortaleza. Os Hubs irão operar com seus voos diretos (demanda local) e receberão as conexões provenientes das seguintes cidades:

- SBFZ: Brasília, Campinas, Confins, Salvador, Recife e Manaus;
- SBGR: Porto Alegre, Florianópolis;
- SBGL: Sem conexões.

A movimentação de voos com destino ou origem sendo a Europa em cada um dos Hubs será (considerando somente a realocação de voos atualmente operados via SBGL e SBGR):

- SBFZ: 890 voos mensais;
- SBGR: 591 voos mensais;
- SBGL: 255 voos mensais.

O novo Hub concentrará o maior número de operações para Europa, esse fator pode ser devido a maior proximidade geográfica do aeroporto de Fortaleza com os destinos Europeus. Pode-se observar ainda que, apesar de concentrar apenas duas conexões, o aeroporto de Guarulhos ainda abrigará uma grande quantidade de voos, devido a sua grande demanda local. O aeroporto do Rio não se comporta na malha proposta como um Hub, uma vez que só comportará a demanda local. Esse é um forte indício de que na próxima análise, na qual só se fixará como Hub obrigatório o SBGR, o aeroporto do Rio não será escolhido como Hub.

Usando a matriz de distâncias para essa configuração, temos que a distância total atravessada por todos os voos com destino ou origem sendo a Europa é de 15.259.493 km. As distâncias totais de cada rota estão resumidas na Tabela 8.

Tabela 8: Tabela com o número de voos e distâncias totais de rota para cada país da Europa, segundo a malha proposta na primeira análise.

Rota	Número de Voos	Distância Total (km)	Distância Total com os voos concentrados em SBGR e SBGL (km)	Redução
Alemanha – Brasil	234	2.200.381	2.274.696	3,27%
Espanha – Brasil	304	2.428.545	2.527.232	3,90%
França – Brasil	291	2.620.699	2.705.298	3,13%
Holanda - Brasil	108	1.012.261	1.043.003	2,95%
Itália – Brasil	214	1.943.376	1.998.566	2,76%
Portugal - Brasil	219	1.650.611	1.709.304	3,43%
Reino Unido – Brasil	212	1.919.526	1.987.179	3,40%
Suíça – Brasil	92	848.582	882.096	3,80%
Turquia – Brasil	62	635.512	653.232	2,71%
Total	1736	15.259.493	15.780.606	3,30%

Pela Tabela 8, vemos que todas as rotas da malha fornecida pela Heurística tiveram uma redução na distância total, fato esse devido a melhor distribuição de rotas dada a possibilidade de realocação de voos em SBFZ, anteriormente concentrados em SBGL e SBGR. O agrupamento Europa, nessa primeira análise, tem uma redução total de 3,3% da distância total viajada por todos os voos.

4.1.2 Análise 2: agrupamento Europa

Na segunda análise, executou-se a Heurística, com a otimização da equação [59] e suas condições de contorno, fixando somente o aeroporto de Guarulhos como Hub obrigatório. Dois novos Hubs foram selecionados, as conexões estão representadas na Figura 11, que representam as variáveis de decisão do problema.

Origem/Conexão	Hub location (Cluster Europa)											Soma
	GUARULHOS	RIO DE JANEIRO	BRASÍLIA	CAMPINAS	CONFINIS	SALVADOR	PORTO ALEGRE	RECIFE	FORTALEZA	MANAUS	FLORIANÓPOLIS	
GUARULHOS	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
RIO DE JANEIRO	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
BRASÍLIA	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
CAMPINAS	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
CONFINIS	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
SALVADOR	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
PORTO ALEGRE	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
RECIFE	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
FORTALEZA	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
MANAUS	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
FLORIANÓPOLIS	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1

Figura 11: Matriz das variáveis de decisão fornecida pela Heurística, fixando somente SBGR como Hub, para o agrupamento Europa.

Pela Figura 11, pode-se perceber que os dois novos Hubs selecionados para compor a malha corrente, deixando fixado SBGR, foram o Aeroporto de Fortaleza (SBFZ) e o Aeroporto de Recife (SBRF). Os Hubs irão operar com seus voos diretos e receberão as conexões provenientes das seguintes cidades:

- SBFZ: Brasília e Manaus;
- SBGR: Porto Alegre;
- SBRF: Rio de Janeiro, Campinas, Confins, Salvador e Florianópolis.

A movimentação de voos com destino ou origem sendo a Europa em cada um dos Hubs será (considerando somente a realocação de voos atualmente operados via SBGL e SBGR):

- SBFZ: 341 voos mensais;
- SBGR: 541 voos mensais;
- SBRF: 855 voos mensais.

Sem se fixar SBGL como Hub obrigatório, tem-se que dois novos Hubs no Nordeste são selecionados para os voos no agrupamento Europa. Esse fato era esperado devido à proximidade geográfica desses aeroportos com os destinos europeus. Na configuração de malha fornecida, a maior concentração de voos será em SBRF, ao contrário da primeira análise onde se tinha uma grande concentração de voos em SBFZ. Como esperado, o número de voos em SBGR diminuiu, uma vez que, não se fixando SBGL como Hub, um maior número de disposições para malha era possível. Todavia, a movimentação de voos via SBGR ainda é alta, devido a grande demanda local.

Usando a matriz de distâncias para a configuração de malha fornecida para a segunda análise, tem-se que a distância total atravessada por todos os voos com destino ou origem sendo a Europa é de 15.201.391 km. As distâncias totais de cada rota estão resumidas na Tabela 9.

Tabela 9: Tabela com o número de voos e distâncias totais de rota para cada país da Europa, segundo a malha proposta na segunda análise.

Rota	Número de Voos	Distância Total (km)	Distância Total com os voos concentrados em SBGR e SBGL (km)	Redução
Alemanha - Brasil	234	2.192.626	2.274.696	3,61%
Espanha - Brasil	304	2.417.587	2.527.232	4,34%
França - Brasil	291	2.613.203	2.705.298	3,40%
Holanda - Brasil	108	1.009.999	1.043.003	3,16%
Itália - Brasil	214	1.930.638	1.998.566	3,40%
Portugal - Brasil	219	1.644.876	1.709.304	3,77%
Reino Unido - Brasil	212	1.916.664	1.987.179	3,55%
Suíça - Brasil	92	844.900	882.096	4,22%
Turquia - Brasil	62	630.898	653.232	3,42%
Total	1736	15.201.391	15.780.606	3,67%

Pela Tabela 9, tem-se que cada rota tem uma redução na distância total viajada. Como esperada, a redução de cada rota foi maior do que aquela encontrada na primeira análise, uma vez que não se fixou SBGL e mais opções de configurações estavam disponíveis para a malha. Essa melhor configuração atingida forneceu uma redução de 3,67%, quando comparada com a malha atual. A variação em relação à primeira análise foi pequena (3,3% na primeira análise). Isso mostra que a inserção de um novo Hub no Nordeste (depois de SBFZ) não tem grande impacto nas distâncias viajadas.

4.1.3 Análise 3: agrupamento Europa

Na terceira análise, executou-se a Heurística, com a otimização da equação [59] e suas condições de contorno, sem se fixar nenhum Hub previamente. Assim, espera-se que a Heurística forneça a melhor configuração possível para 3 Hubs quaisquer. O resultado das conexões fornecidas pela Heurística seguem na Figura 12.

Hub location (Cluster Europa)												
Origem/Conexão	GUARULHOS	RIO DE JANEIRO	BRASÍLIA	CAMPINAS	CONFINES	SALVADOR	PORTO ALEGRE	RECIFE	FORTALEZA	MANAUS	FLORIANÓPOLIS	Soma
GUARULHOS	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
RIO DE JANEIRO	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
BRASÍLIA	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
CAMPINAS	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
CONFINES	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
SALVADOR	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
PORTO ALEGRE	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
RECIFE	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
FORTALEZA	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
MANAUS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
FLORIANÓPOLIS	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1

Figura 12: Matriz das variáveis de decisão fornecida pela Heurística, para a otimização total da malha do agrupamento Europa.

Pela Figura 12, pode-se perceber que os três Hubs selecionados na terceira análise foram o aeroporto de Fortaleza (SBFZ), o aeroporto de Recife (SBRF) e o aeroporto de Manaus (SBEG). Os Hubs irão operar com seus voos diretos e receberão as conexões provenientes das seguintes cidades:

- SBFZ: Brasília;
- SBRF: Porto Alegre, Rio de Janeiro, Campinas, Confins, Salvador, Florianópolis e São Paulo;
- SBEG: Sem conexões.

A movimentação de voos com destino ou origem sendo a Europa em cada um dos Hubs será (considerando somente a realocação de voos atualmente operados via SBGL e SBGR):

- SBFZ: 292 voos mensais;
- SBEG: 49 voos mensais;
- SBRF: 1395 voos mensais.

Era esperado que o SBFZ e SBRF fossem selecionados, pois na análise anterior esses aeroportos já eram Hubs. Um fato interessante é que praticamente a totalidade dos voos foi realocada para um Hub no Nordeste. Tem-se que a proximidade geográfica com os destinos Europeus favorece a alocação de Hubs nessa região. O aeroporto de Manaus não atuará propriamente como Hub nessa configuração, uma vez que só terá voos diretos (demanda local). A Heurística forneceu SBEG na rede ótima, provavelmente, pelas grandes distâncias necessárias para suprir aquela demanda com conexões, mesmo que em aeroportos no Nordeste.

Usando a matriz de distâncias para a configuração da malha fornecida para otimização de três Hubs quaisquer, tem-se que a distância total atravessada por todos os voos com destino ou origem sendo a Europa é de 15.159.983 km. As distâncias totais de cada rota estão resumidas na Tabela 10.

Tabela 10: Tabela com o número de voos e distâncias totais de rota para cada país da Europa, segundo a malha proposta na segunda análise.

Rota	Número de Voos	Distância Total (km)	Distância Total com os voos concentrados em SBGR e SBGL (km)	Redução
Alemanha - Brasil	234	2.186.230	2.274.696	3,89%
Espanha - Brasil	304	2.410.228	2.527.232	4,63%
França - Brasil	291	2.605.729	2.705.298	3,68%
Holanda - Brasil	108	1.007.261	1.043.003	3,43%
Itália - Brasil	214	1.925.842	1.998.566	3,64%
Portugal - Brasil	219	1.640.149	1.709.304	4,05%
Reino Unido - Brasil	212	1.911.887	1.987.179	3,79%
Suíça - Brasil	92	842.396	882.096	4,50%
Turquia - Brasil	62	630.261	653.232	3,52%
Total	1736	15.159.983	15.780.606	3,93%

Pela Tabela 10, tem-se que cada rota tem uma redução de distância viajada superior a da segunda análise, como era esperado. Todavia, a variação da distância total é pequena, subindo de 3,67% para 3,93%. A segunda configuração já fornecia dois Hubs no Nordeste, tomando vantagem das suas localizações geográficas. A terceira configuração (considerando voos diretos de SBEG) não gerou grandes variações nas distâncias viajadas, quando comparada a anterior.

4.1.4 Análise com preço do QAV (agrupamento Europa)

Foi acrescentado na formulação utilizada um fator corretivo γ_i , referente ao preço do QAV para os diferentes aeroportos. A função objetivo para essa análise é representada pela equação [60].

$$MIN Z = \sum_i \sum_j \gamma_i d_{ji} Y_{ij} (O_i + D_i) \quad [60]$$

O fator γ_i foi estimado da seguinte maneira:

- $\gamma_i = 1$, para o aeroporto de Guarulhos (SBGR);
- $\gamma_i = \frac{\text{Preço do QAV no aeroporto } i}{\text{Preço do QAV em SBGR}}$, para os demais aeroportos.

Com esse fator corretivo na função objetivo, pode-se fazer uma análise levando em consideração a variação regional do preço do querosene de aviação. Os valores dos preços do QAV foram extraídos de uma planilha fornecida pela Agência Nacional do Petróleo (ANP). A planilha possui os valores semanais dos preços do QAV por região, de 2005 a 2014. O do preço do QAV utilizado no modelo foi obtido a partir da média dos preços das últimas 12 semanas de 2014. A Tabela 11 resume os preços considerados em cada região. A Tabela 12 resume o valor do fator corretivo para cada região.

Tabela 11: Tabela com os preços médios do QAV por região, nas 12 últimas semanas de 2014.

Produto	Norte (R\$/litro)	Nordeste (R\$/litro)	Centro-Oeste (R\$/litro)	Sul (R\$/litro)	Sudeste (R\$/litro)
Querosene de Aviação – QAV	1,88	1,87	***	1,93	1,90

Tabela 12: Valor do fator corretivo para cada região.

Fator corretivo	Norte	Nordeste	Centro-Oeste	Sul	Sudeste
γ_i	0,989	0,986	***	1,017	1,000

Foi executada a heurística, com a otimização da equação [60], para os três tipos de análises. Em cada análise obteve-se a mesma rede comparada com aquela fornecida pela heurística sem o fator corretivo na função objetivo, representadas pela Figura 10, Figura 11 e Figura 12. Isso ocorreu, pois o fator corretivo favoreceu ainda mais os Hubs no Nordeste, uma vez que os aeroportos do Nordeste possuíam o menor valor γ_i . Essa análise ficou limitada, por ser feita com o preço médio do QAV por região, e não por cidade. Uma análise baseada no preço do QAV por cidade poderia favorecer outras rotas ou até mudar a alocação de Hubs.

4.2 Agrupamento América do Norte

O agrupamento América do Norte era composto por três diferentes países. Ao contrário do que foi feito na Europa, cada aeroporto americano foi considerado como um destino

diferente, uma vez que o tamanho do território americano era muito superior ao de cada país Europeu, ou mesmo do México e do Canadá. Caso fosse feita uma distância média, perderia-se sensibilidade de análise. Dessa forma, o número total de destinos/origens internacionais considerados foi igual a 15, sendo 13 cidades do território dos Estados Unidos.

Atualmente, a malha aérea para a América do Norte tem o número de voos mensais, rotas e distâncias de rota representadas pela Tabela 13.

Tabela 13: Tabela com o número de voos e distância de rota para todos os pares origem-destino do agrupamento América do Norte.

Rota	Número de Voos	Distância de rota (km)
Guarulhos – Canadá	62	8167
Rio De Janeiro - Canadá	26	8247
Guarulhos – Atlanta	124	7488
Rio De Janeiro - Atlanta	62	7621
Brasília – Atlanta	62	6710
Rio de Janeiro - Charlotte Douglas Intl	63	7554
Guarulhos – Chicago	62	8404
Guarulhos – Dallas	62	8226
Rio de Janeiro - Dallas	27	8403
Guarulhos - Detroit	62	8198
Campinas - Fort Lauderdale	86	6492
Guarulhos - Houston	62	7888
Rio de Janeiro - Houston	62	8072
Manaus – Houston	1	5239
Guarulhos - Los Angeles	103	9907
Guarulhos – Miami	374	6553
Rio de Janeiro - Miami	185	6699
Brasília – Miami	95	5792
Campinas – Miami	69	6475
Confins – Miami	89	6378
Salvador - Miami	35	6246
Porto Alegre - Miami	31	6911
Recife – Miami	53	6178
Fortaleza - Miami	12	5565
Manaus – Miami	114	3865
Guarulhos - New York	242	7636
Rio de Janeiro - New York	116	7703
Campinas - New York	24	7567
Guarulhos - Newark	62	7656
Guarulhos - Orlando	191	6848
Rio de Janeiro - Orlando	2	6988
Campinas - Orlando	63	6771
Guarulhos - Washington	62	7623

Rota	Número de Voos	Distância de rota (km)
Guarulhos - México	134	7423
Rio de Janeiro - México	42	7657
Manaus – México	7	4990

Comparando a Tabela 12 com a Tabela 7, tem-se que o agrupamento América do Norte possui mais destinos e rotas do que o agrupamento Europeu. Novamente foi calculada a distância atravessada por todos os voos da rede, considerando somente os voos concentrados em SBGR e SBGL. A distância obtida foi de 16.390.965 km, que é maior do que a do agrupamento Europa. Para saber as origens desses voos que são atualmente concentrados em Guarulhos e Rio de Janeiro, novamente, tomou-se a premissa apresentada na Seção 3.2, onde se considera que a origem dos passageiros é proporcional a fatia de voos domésticos dos aeroportos nacionais de origem.

Foi executada a Heurística para otimização de somente dos voos que são concentrados atualmente em SBGR e SBGL (2188 voos no total), ou seja, os demais 740 voos que não são operados via rotas com os Hubs SBGR e SBGL continuarão a operar por seus respectivos aeroportos atuais. A otimização foi feita segundo a equação [59] e suas respectivas condições de contorno.

4.2.1 Análise 1: agrupamento América do Norte

Na análise 1 para o agrupamento América do Norte, primeiramente, fixou-se SBGR e SBGL como Hubs obrigatórios. Na sequência, adicionou-se um novo Hub na rede, para avaliar qual seria o impacto na distância total viajada na nova configuração de rede. A rotina de otimização forneceu como novo Hub o Aeroporto de Manaus (SBEG), as conexões estão representadas na Figura 13, que representa as variáveis de decisão do problema.

Hub location (Cluster América do Norte)												
Origem/Conexão	GUARULHOS	RIO DE JANEIRO	BRASÍLIA	CAMPINAS	CONFINS	SALVADOR	PORTO ALEGRE	RECIFE	FORTALEZA	MANAUS	FLORIANÓPOLIS	Soma
GUARULHOS	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
RIO DE JANEIRO	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
BRASÍLIA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
CAMPINAS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
CONFINS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
SALVADOR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
PORTO ALEGRE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
RECIFE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
FORTALEZA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
MANAUS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
FLORIANÓPOLIS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1

Figura 13: Matriz das variáveis de decisão fornecida pela Heurística, fixando SBGR e SBGL como Hubs, para o agrupamento América do Norte.

Pela Figura 13, pode-se perceber que se ao adicionar um Hub na malha corrente, deixando fixados os aeroportos de Guarulhos e do Galeão, o novo Hub alocado na rede será o aeroporto de Manaus. Os Hubs irão operar com seus voos diretos (demanda local) e receberão as conexões provenientes das seguintes cidades:

- SBEG: Brasília, Campinas, Confins, Salvador, Porto Alegre, Florianópolis, Recife, Fortaleza;
- SBGR: Sem conexões.
- SBGL: Sem conexões.

A movimentação de voos com destino ou origem sendo a América do Norte em cada um dos Hubs será (considerando somente a realocação de voos atualmente operados via SBGL e SBGR):

- SBEG: 1304 voos mensais;
- SBGR: 564 voos mensais;
- SBGL: 320 voos mensais.

Segundo a rotina de otimização, o novo Hub concentrará todas as conexões para os destinos da América do Norte. Esse fato pode ser justificado pela maior proximidade geográfica do aeroporto de Manaus com os destinos da América do Norte. Pode-se observar ainda que apesar de não possuir conexões, o aeroporto de Guarulhos ainda abrigará uma grande quantidade de voos, devido à sua grande demanda local. O mesmo fato pode ser observado para SBGL, todavia a demanda local desse aeroporto não é tão grande quanto Guarulhos. Na realidade, SBGL e SBGR não atuarão propriamente como Hubs na rede fornecida pela

Heurística, uma vez que não concentrarão voos de outras localidades. Tem-se, portanto, um forte indício que nas próximas análises, onde não se incluirá condições de contorno obrigando SBGL e SBGR como hubs, esses não irão compor a rede com voos diretos para os destinos da América do Norte.

Usando a matriz de distâncias para essa configuração, temos que a distância total atravessada por todos os voos com destino ou origem sendo a América do Norte é de 16.067.555 km. As distâncias totais de cada rota estão resumidas na Tabela 14.

Tabela 14: Tabela com o número de voos e distâncias totais de rota para cada país da América do Norte, segundo a malha proposta na primeira análise.

Rota	Número de Voos	Distância Total (km)	Distância Total com os voos concentrados em SBGR e SBGL (km)	Redução
Canadá – Brasil	88	708.030	720.776	1,77%
Atlanta – Brasil	186	1.365.681	1.401.014	2,52%
Charlotte Douglas – Brasil	63	459.783	475.902	3,39%
Chicago - Brasil	62	518.239	521.048	0,54%
Dallas – Brasil	89	721.212	736.893	2,13%
Detroit – Brasil	62	499.853	508.276	1,66%
Houston – Brasil	124	963.863	989.520	2,59%
Los Angeles – Brasil	103	1.014.684	1.020.421	0,56%
Miami – Brasil	559	3.582.786	3.690.137	2,91%
New York – Brasil	358	2.696.658	2.741.460	1,63%
Newark – Brasil	62	468.120	474.672	1,38%
Orlando – Brasil	193	1.293.641	1.321.944	2,14%
Washington – Brasil	62	464.833	472.626	1,65%
México – Brasil	176	1.310.171	1.316.276	0,46%
Total	2188	16.067.555	16.390.965	1,97%

Pela Tabela 14, vemos que houve uma redução na distância total em todas as rotas da malha fornecida pela Heurística, devido à melhor distribuição de rotas, com a possibilidade de realocação de voos em SBEG, anteriormente concentrados em SBGL e SBGR. O agrupamento América do Norte, nessa primeira análise, tem uma redução total de 1,97% da distância total viajada por todos os voos.

4.2.2 Análise 2: agrupamento América do Norte

Na segunda análise para o agrupamento América do Norte, executou-se a Heurística, com a otimização da equação [59] e de suas condições de contorno. Além disso, fixou-se somente o aeroporto de Guarulhos como Hub obrigatório. Dois novos Hubs foram selecionados para a rede com os destinos do agrupamento América do Norte. As conexões estão representadas na Figura 14, que representam as variáveis de decisão do problema.

Hub location (Cluster América do Norte)												
Origem/Conexão	GUARULHOS	RIO DE JANEIRO	BRASÍLIA	CAMPINAS	CONFINS	SALVADOR	PORTO ALEGRE	RECIFE	FORTALEZA	MANAUS	FLORIANÓPOLIS	Soma
GUARULHOS	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
RIO DE JANEIRO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
BRASÍLIA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
CAMPINAS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
CONFINS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
SALVADOR	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
PORTO ALEGRE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
RECIFE	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
FORTALEZA	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
MANAUS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
FLORIANÓPOLIS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1

Figura 14: Matriz das variáveis de decisão fornecida pela Heurística, fixando somente SBGR como Hub, para o agrupamento América do Norte.

Pela Figura 14, pode-se perceber que os dois novos Hubs selecionados para compor a malha corrente, deixando fixado SBGR, foram o Aeroporto de Fortaleza (SBFZ) e o Aeroporto de Manaus (SBEG). Os Hubs irão operar com seus voos diretos e receberão as conexões provenientes das seguintes cidades:

- SBFZ: Salvador e Recife;
- SBGR: Sem conexões;
- SBEG: Rio de Janeiro, Brasília, Campinas, Confins, Porto Alegre e Florianópolis.

A movimentação de voos com destino ou origem sendo a América do Norte em cada um dos Hubs será (considerando somente a realocação de voos atualmente operados via SBGL e SBGR):

- SBEG: 1358 voos mensais;
- SBGR: 563 voos mensais;
- SBFZ: 266 voos mensais.

Sem se fixar SBGL como Hub obrigatório, tem-se que um Hub na região Nordeste e um na região Norte são selecionados para os voos no agrupamento América do Norte. Esse fato era esperado devido à proximidade geográfica desses aeroportos com os destinos da América do Norte, principalmente o SBEG. Em comparação com a análise anterior, o SBEG concentra ainda mais voos, o SBFZ vai concentrar as conexões do Nordeste, enquanto que SBGR não atuará propriamente como um Hub, pois só irá operar com a demanda local. Apesar disso, SBGR ainda tem uma grande quantidade de voos, devido a sua alta movimentação local.

Usando a matriz de distâncias para a configuração de malha fornecida para a segunda análise, tem-se que a distância total atravessada por todos os voos com destino ou origem sendo a América do Norte é de 15.916.779 km. As distâncias totais de cada rota estão resumidas na Tabela 15.

Tabela 15: Tabela com o número de voos e distâncias totais de rota para cada país da América do Norte, segundo a malha proposta na segunda análise.

Rota	Número de Voos	Distância Total (km)	Distância Total com os voos concentrados em SBGR e SBGL (km)	Redução
Canadá – Brasil	88	696.576	720.776	3,36%
Atlanta – Brasil	186	1.351.607	1.401.014	3,53%
Charlotte Douglas – Brasil	63	453.855	475.902	4,63%
Chicago – Brasil	62	511.867	521.048	1,76%
Dallas – Brasil	89	717.940	736.893	2,57%
Detroit – Brasil	62	492.761	508.276	3,05%
Houston – Brasil	124	960.740	989.520	2,91%
Los Angeles – Brasil	103	1.014.702	1.020.421	0,56%
Miami – Brasil	559	3.553.315	3.690.137	3,71%
New York – Brasil	358	2.647.268	2.741.460	3,44%
Newark – Brasil	62	459.647	474.672	3,17%
Orlando – Brasil	193	1.281.682	1.321.944	3,05%
Washington – Brasil	62	457.393	472.626	3,22%
México – Brasil	176	1.317.426	1.316.276	-0,09%
Total	2188	15.916.779	16.390.965	2,89%

Pela Tabela 15, nota-se que quase a totalidade das rotas tem uma redução da distância em relação à configuração atual. A rota México – Brasil teve um incremento na distância viajada em comparação com a configuração atual de rotas, pois a configuração fornecida é desfavorável para essa rota, visto que havia muitos voos diretos do Rio para o México. Mas,

como a heurística foi executada para todas as rotas do agrupamento, ela fornece o melhor resultado para todas as rotas atuando em conjunto. A configuração atingida forneceu uma redução de 2,89%, quando comparada com a malha atual. A variação em relação à primeira análise foi razoável (1,97%, na primeira análise), mostrando que a inserção de um novo Hub no Nordeste, depois de SBEG, terá um impacto considerável nas distâncias viajadas. Como o Hub SBFZ também foi selecionado para atuar no agrupamento Europa, a concentração de voos no mesmo pode gerar economias de escala na operação das companhias aéreas, tornando esse aeroporto ainda mais vantajoso economicamente.

4.2.3 Análise 3: agrupamento América do Norte

Na terceira análise, executou-se a Heurística para as rotas do agrupamento América do Norte, com a otimização da equação [59] e de suas condições de contorno, sem se fixar nenhum Hub previamente. Assim, espera-se que a Heurística forneça a melhor configuração possível para três Hubs quaisquer. O resultado das conexões fornecidas pela Heurística segue na Figura 15.

Hub location (Cluster América do Norte)												
Origem/Conexão	GUARULHOS	RIO DE JANEIRO	BRASÍLIA	CAMPINAS	CONFINS	SALVADOR	PORTO ALEGRE	RECIFE	FORTALEZA	MANAUS	FLORIANÓPOLIS	Soma
GUARULHOS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
RIO DE JANEIRO	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
BRASÍLIA	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
CAMPINAS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
CONFINS	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
SALVADOR	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
PORTO ALEGRE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
RECIFE	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
FORTALEZA	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
MANAUS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
FLORIANÓPOLIS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1

Figura 15: Matriz das variáveis de decisão fornecida pela Heurística, para a otimização total da malha para o agrupamento América do Norte.

Pela Figura 15, pode-se perceber que os três Hubs selecionados na terceira análise foram o aeroporto de Brasília (SBBR), o aeroporto de Fortaleza (SBFZ) e o aeroporto de Manaus (SBEG). Os Hubs irão operar com seus voos diretos e receberão as conexões provenientes das seguintes cidades:

- SBBR: Rio de Janeiro e Confins;

- SBFZ: Salvador e Recife;
- SBEG: Guarulhos, Campinas, Porto Alegre, Florianópolis.

A movimentação de voos com destino ou origem sendo a Europa em cada um dos Hubs será (considerando somente a realocação de voos atualmente operados via SBGL e SBGR):

- SBBR: 786 voos mensais;
- SBFZ: 370 voos mensais;
- SBEG: 1032 voos mensais.

Não se fixando SBGL e SBGR como Hubs obrigatórios, têm-se os dois Hubs da análise anterior, além do Hub de SBBR. Foi a primeira vez que o aeroporto de Brasília surge na rede proposta pela Heurística. Além disso, ele tem uma concentração grande de voos, uma vez que abrigará a demanda do Rio, de Brasília e de Confins, que são altas. O aeroporto de Manaus ainda abrigará o maior número de conexões e voos, devido à grande proximidade geográfica desse aeroporto com os destinos do agrupamento América do Norte. Em comparação com a segunda análise, o SBFZ tem mais voos e conexões, indicando uma grande vantagem na alocação desse Hub, principalmente considerando que ele também foi selecionado no agrupamento Europa.

Usando a matriz de distâncias para a configuração da malha fornecida para otimização de três Hubs quaisquer, tem-se que a distância total atravessada por todos os voos com destino ou origem sendo as rotas da América do Norte é de 15.897.418 km. As distâncias totais de cada rota estão resumidas na Tabela 16.

Tabela 16: Tabela com o número de voos e distâncias totais de rota para cada país da América do Norte, segundo a malha proposta na segunda análise.

Rota	Número de Voos	Distância Total (km)	Distância Total com os voos concentrados em SBGR e SBGL (km)	Redução
Canadá – Brasil	88	693.736	720.776	3,75%
Atlanta – Brasil	186	1.349.765	1.401.014	3,66%
Charlotte Douglas – Brasil	63	452.708	475.902	4,87%
Chicago – Brasil	62	510.760	521.048	1,97%
Dallas – Brasil	89	718.787	736.893	2,46%
Detroit – Brasil	62	491.233	508.276	3,35%
Houston – Brasil	124	962.271	989.520	2,75%
Los Angeles – Brasil	103	1.017.658	1.020.421	0,27%
Miami – Brasil	559	3.551.192	3.690.137	3,77%

Rota	Número de Voos	Distância Total (km)	Distância Total com os voos concentrados em SBGR e SBGL (km)	Redução
New York – Brasil	358	2.633.485	2.741.460	3,94%
Newark – Brasil	62	457.308	474.672	3,66%
Orlando – Brasil	193	1.280.414	1.321.944	3,14%
Washington – Brasil	62	455.537	472.626	3,62%
México – Brasil	176	1.322.562	1.316.276	-0,48%
Total	2188	15.897.418	16.390.965	3,01%

Pela Tabela 16, tem-se que quase todas as rotas têm uma redução de distância viajada quando comparada com a configuração atual. Assim como na segunda análise desse agrupamento, temos que uma rota tem uma distância viajada maior, já que a Heurística foi executada para o agrupamento em conjunto, ou seja, ela encontra a melhor configuração somando todas as rotas. Em comparação com a segunda análise, temos que a inserção do Hub de SBBR no lugar de SBGR causou pouca diferença, com uma redução de 3,01% na distância, em comparação com os 2,89% de redução da análise 2. Esse é um forte indicativo que a inserção de SBBR na rede como Hub talvez não compense os outros gastos não incluídos no modelo, pois ela pouco influencia a distância total viajada.

4.2.4 Análise com preço do QAV (agrupamento América do Norte)

Foi acrescentada, novamente, no modelo o fator corretivo γ_i , para avaliar se a variação do preço do QAV em cada região mudaria o resultado da Heurística. A função objetivo para essa análise é representada pela equação [60].

Com esse fator corretivo na função objetivo, pôde-se fazer uma análise levando em consideração a variação regional do preço do querosene de aviação. A Tabela 11 resume os preços considerados em cada região. A Tabela 12 resume o valor do fator corretivo para cada região.

Foi executada a heurística, com a otimização da equação [60], para os três tipos de análises. Em cada análise obteve-se os mesmos Hubs das redes nas quais a Heurística foi executada sem o fator corretivo na função objetivo, representadas pela Figura 13, Figura 14 e Figura 15. Os Hubs escolhidos foram os mesmos e também nenhuma rota foi alterada. Esse fato

ocorreu, pois os fatores corretivos da região Norte e Nordeste são os menores, o que favorece ainda mais a alocação de Hubs nessa região. Novamente essa análise foi limitada, por ter sido feita a partir do preço do QAV por região, e não por cidade.

4.3 Estimativa da economia de combustível

Para cada uma das redes propostas de cada agrupamento, foi estimada a economia de combustível devido à nova configuração de rota quando comparada com a situação atual.

Para essa estimativa foi considerado que os voos eram operados por uma aeronave Boeing B777-300ER, foi escolhida essa aeronave, devido à concentração de voos internacionais da TAM com esse tipo de aeronave. Os dados de consumo de combustível dessa aeronave foram retirados do Manual da Boeing, segue na Figura 16.

PRESSURE ALTITUDE (FT)	TOTAL FUEL FLOW (LB/HR)											
	WEIGHT (1000 LB)											
	800	760	720	680	640	600	560	520	480	440	400	360
43000												
40000										12870	11530	10230
35000						17580	16040	14730	13450	12180	10970	9810
30000	24000	22350	20800	19430	18140	16850	15560	14300	13070	11850	10460	9680
25000	22890	21520	20140	18820	17570	16380	15200	13760	12420	11330	10400	9730
20000	22070	20850	19660	18410	16950	15600	14360	13300	12310	11370	10490	9880
15000	21390	19980	18680	17480	16420	15370	14330	13320	12370	11500	10680	10110
10000	20650	19600	18560	17530	16500	15480	14460	13480	12550	11680	10870	10350
5000	20850	19830	18810	17770	16740	15730	14750	13820	12940	12110	11320	10800
1500	21080	20030	18980	17950	16940	15950	15000	14110	13280	12470	11690	11180

Figura 16: Dados de consumo de combustível do B777-300ER

Em cada análise, tinha-se o valor da diferença das distâncias na configuração proposta em relação à configuração atual. As diferenças eram na ordem de 2 a 5%. Considerou-se que essa variação de distância era percorrida em cruzeiro, com a velocidade de cruzeiro. Deste modo, tinha-se a variação do tempo que todos os voos iriam percorrer em cada nova rota. Além disso, por simplicidade de cálculo considerou-se que a variação de consumo era gerada quando a aeronave estava próxima da aterrissagem. Com base no site da companhia TAM, temos que o peso de máximo de aterrissagem da aeronave é de 251 toneladas. Considerou-se, que o peso médio era de 200 toneladas, ou aproximadamente, 440000 Lb. Com uma altitude de cruzeiro de 40000 ft, era possível obter o consumo horário de combustível pela Figura 16. O valor da densidade do QAV foi retirado da base de informações da Petrobrás [45], no caso 0,804 Kg/L. O preço do QAV foi retirado da base da ANP, a partir da média nacional das últimas 12 semanas, cerca de 1,80 R\$/L. As Tabelas a seguir contêm os valores estimados de economia

mensal de combustível para as três configurações sugeridas para o agrupamento Europa e o agrupamento América do Norte.

Tabela 17: Tabela com a economia de combustível referente à Análise 1, agrupamento Europa.

Rota	Varição de distância (km)	Velocidade de cruzeiro (km/h)	Varição no tempo de voo de todas as operações (h)	Consumo da aeronave (LB/h)	Economia de combustível (m ³)	Economia (Milhões R\$)
Alemanha - Brasil	74.315	905	82,1	12870	850	1,53
Espanha - Brasil	98.687	905	109,0	12870	1128	2,03
França - Brasil	84.599	905	93,5	12870	967	1,74
Holanda - Brasil	30.742	905	34,0	12870	351	0,63
Itália - Brasil	55.190	905	61,0	12870	631	1,14
Portugal - Brasil	58.693	905	64,9	12870	671	1,21
Reino Unido - Brasil	67.653	905	74,8	12870	774	1,39
Suíça - Brasil	33.514	905	37,0	12870	383	0,69
Turquia - Brasil	17.720	905	19,6	12870	203	0,36
Total	521.113	905	575,8	12870	5958	10,72

Tabela 18: Tabela com a economia de combustível referente à Análise 2, agrupamento Europa.

Rota	Varição de distância (km)	Velocidade de cruzeiro (km/h)	Varição no tempo de voo de todas as operações (h)	Consumo da aeronave (LB/h)	Economia de combustível (m ³)	Economia (Milhões R\$)
Alemanha - Brasil	82.070	905	90,7	12870	938	1,69
Espanha - Brasil	109.645	905	121,2	12870	1254	2,26
França - Brasil	92.095	905	101,8	12870	1053	1,90
Holanda - Brasil	33.004	905	36,5	12870	377	0,68
Itália - Brasil	67.928	905	75,1	12870	777	1,40
Portugal - Brasil	64.428	905	71,2	12870	737	1,33
Reino Unido - Brasil	70.515	905	77,9	12870	806	1,45
Suíça - Brasil	37.196	905	41,1	12870	425	0,77
Turquia - Brasil	22.334	905	24,7	12870	255	0,46
Total	579.215	905	640,0	12870	6623	11,92

Tabela 19: Tabela com a economia de combustível referente à Análise 3, agrupamento Europa.

Rota	Varição de distância (km)	Velocidade de cruzeiro (km/h)	Varição no tempo de voo de todas as operações (h)	Consumo da aeronave (LB/h)	Economia de combustível (m ³)	Economia (Milhões R\$)
Alemanha - Brasil	88.466	905	97,8	12870	1011	1,82
Espanha - Brasil	117.004	905	129,3	12870	1338	2,41
França - Brasil	99.569	905	110,0	12870	1138	2,05
Holanda - Brasil	35.742	905	39,5	12870	409	0,74
Itália - Brasil	72.724	905	80,4	12870	832	1,50
Portugal - Brasil	69.155	905	76,4	12870	791	1,42

Rota	Varição de distância (km)	Velocidade de cruzeiro (km/h)	Varição no tempo de voo de todas as operações (h)	Consumo da aeronave (LB/h)	Economia de combustível (m ³)	Economia (Milhões R\$)
Reino Unido – Brasil	75.292	905	83,2	12870	861	1,55
Suíça – Brasil	39.700	905	43,9	12870	454	0,82
Turquia – Brasil	22.971	905	25,4	12870	263	0,47
Total	620.623	905	685,8	12870	7096	12,77

Analisando a Tabela 17, tem-se que a alocação do aeroporto de Fortaleza como novo Hub para a Europa (atuando em conjunto com SBGR e SBGL), segundo as rotas propostas na Figura 10, gerará uma economia mensal de combustível de R\$ 10,72 milhões. Pela Tabela 18, tem-se que a alocação do aeroporto de fortaleza e de Recife atuando com SBGR como Hubs, segundo as rotas propostas na Figura 11, gerará uma economia de combustível mensal de R\$ 11,92 milhões. Pela Tabela 19, tem-se que a rede ótima proposta pela Figura 12, gerará uma economia mensal de combustível de R\$ 12,77 milhões. Segundo os dados anuário da ANAC de 2013 [2], o lucro bruto da indústria foi de R\$ 2,054 bilhões. Como as análises foram feitas em ordem crescente de dificuldade de implementação, temos que a somente alocação de SBFZ como novo Hub para Europa gerará uma economia de combustível referente a 6,26% do Lucro bruto da indústria.

Tabela 20: Tabela com a economia de combustível referente à Análise 1, agrupamento América do Norte.

Rota	Varição de distância (km)	Velocidade de cruzeiro (km/h)	Varição no tempo de voo de todas as operações (h)	Consumo da aeronave (LB/h)	Economia de combustível (m ³)	Economia (Milhões R\$)
Canadá – Brasil	12.746	905	14,1	12870	145,7	0,26
Atlanta – Brasil	35.333	905	39,0	12870	404,0	0,73
Charlotte Douglas – Brasil	16.119	905	17,8	12870	184,3	0,33
Chicago – Brasil	2.809	905	3,1	12870	32,1	0,06
Dallas – Brasil	15.681	905	17,3	12870	179,3	0,32
Detroit – Brasil	8.423	905	9,3	12870	96,3	0,17
Houston – Brasil	25.657	905	28,4	12870	293,4	0,53
Los Angeles – Brasil	5.737	905	6,3	12870	65,6	0,12
Miami – Brasil	107.351	905	118,6	12870	1227,4	2,21
New York – Brasil	44.802	905	49,5	12870	512,3	0,92
Newark – Brasil	6.552	905	7,2	12870	74,9	0,13
Orlando – Brasil	28.303	905	31,3	12870	323,6	0,58

Rota	Varição de distância (km)	Velocidade de cruzeiro (km/h)	Varição no tempo de voo de todas as operações (h)	Consumo da aeronave (LB/h)	Economia de combustível (m ³)	Economia (Milhões R\$)
Washington – Brasil	7.793	905	8,6	12870	89,1	0,16
México – Brasil	6.105	905	6,7	12870	69,8	0,13
Total	323.410	905	357,4	12870	3697,8	6,66

Tabela 21: Tabela com a economia de combustível referente à Análise 2, agrupamento América do Norte.

Rota	Varição de distância (km)	Velocidade de cruzeiro (km/h)	Varição no tempo de voo de todas as operações (h)	Consumo da aeronave (LB/h)	Economia de combustível (m ³)	Economia (Milhões R\$)
Canadá – Brasil	24.200	905	26,7	12870	276,7	0,50
Atlanta – Brasil	49.407	905	54,6	12870	564,9	1,02
Charlotte Douglas – Brasil	22.047	905	24,4	12870	252,1	0,45
Chicago – Brasil	9.181	905	10,1	12870	105,0	0,19
Dallas – Brasil	18.953	905	20,9	12870	216,7	0,39
Detroit – Brasil	15.515	905	17,1	12870	177,4	0,32
Houston – Brasil	28.780	905	31,8	12870	329,1	0,59
Los Angeles – Brasil	5.719	905	6,3	12870	65,4	0,12
Miami – Brasil	136.822	905	151,2	12870	1564,4	2,82
New York – Brasil	94.192	905	104,1	12870	1077,0	1,94
Newark – Brasil	15.025	905	16,6	12870	171,8	0,31
Orlando – Brasil	40.262	905	44,5	12870	460,3	0,83
Washington – Brasil	15.233	905	16,8	12870	174,2	0,31
México – Brasil	-1.150	905	-1,3	12870	-13,1	-0,02
Total	474.186	905	524,0	12870	5421,7	9,76

Tabela 22: Tabela com a economia de combustível referente à Análise 3, agrupamento América do Norte.

Rota	Varição de distância (km)	Velocidade de cruzeiro (km/h)	Varição no tempo de voo de todas as operações (h)	Consumo da aeronave (LB/h)	Economia de combustível (m ³)	Economia (Milhões R\$)
Canadá – Brasil	27.040	905	29,9	12870	309,2	0,56
Atlanta – Brasil	51.249	905	56,6	12870	586,0	1,05
Charlotte Douglas – Brasil	23.194	905	25,6	12870	265,2	0,48
Chicago – Brasil	10.288	905	11,4	12870	117,6	0,21
Dallas – Brasil	18.106	905	20,0	12870	207,0	0,37
Detroit – Brasil	17.043	905	18,8	12870	194,9	0,35
Houston – Brasil	27.249	905	30,1	12870	311,6	0,56

Rota	Variação de distância (km)	Velocidade de cruzeiro (km/h)	Variação no tempo de voo de todas as operações (h)	Consumo da aeronave (LB/h)	Economia de combustível (m ³)	Economia (Milhões R\$)
Los Angeles – Brasil	2.763	905	3,1	12870	31,6	0,06
Miami – Brasil	138.945	905	153,5	12870	1588,7	2,86
New York – Brasil	107.975	905	119,3	12870	1234,5	2,22
Newark – Brasil	17.364	905	19,2	12870	198,5	0,36
Orlando – Brasil	41.530	905	45,9	12870	474,8	0,85
Washington – Brasil	17.089	905	18,9	12870	195,4	0,35
México – Brasil	-6.286	905	-6,9	12870	-71,9	-0,13
Total	493.547	905	545,4	12870	5643,1	10,16

Analisando a Tabela 20, tem-se que a alocação do aeroporto de Manaus como novo Hub para a Europa (atuando em conjunto com SBGR e SBGL), segundo as rotas propostas na Figura 13, gerará uma economia mensal de combustível de R\$ 6,66 milhões. Pela Tabela 21, tem-se que a alocação do aeroporto de Manaus e Fortaleza atuando com SBGR como Hubs, segundo as rotas propostas na Figura 14, gerará uma economia de combustível mensal de R\$ 9,76 milhões. Pela Tabela 22, tem-se que a rede ótima proposta pela Figura 15, gerará uma economia mensal de combustível de R\$ 10,16 milhões. Nota-se que a variação na economia de combustível entre as redes geradas nas Análises 2 e 3 é pequena, gerando forte indício que os outros custos inerentes podem desfavorecer a alocação do terceiro Hub (SBBR) no lugar de SBGR. As análises no agrupamento América do Norte também foram feitas em ordem crescente de dificuldade de implementação, temos que somente a alocação de SBEG como novo Hub para Europa gerará uma economia de combustível referente a 3,89% do Lucro bruto da indústria.

Pode-se observar que os valores de economia de combustível para as configurações do agrupamento Europa geraram uma economia de combustível superior ao das configurações do agrupamento América do Norte, apesar do segundo possuir maior movimentação de voos e número de rotas. Assim, nota-se que a malha aérea de voos para a Europa pode ser reconfigurada de modo a gerar um forte impacto na estrutura de custos das companhias aéreas, principalmente, concentrando as conexões no Nordeste (SBFZ, inicialmente).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusão

Nesse trabalho gerou-se uma série de análises para alocação de Hubs para voos internacionais com destino ou origem em aeroportos brasileiros. Para tanto foram considerados dois agrupamentos um com os voos para a Europa e o outro com os voos para a América do Norte. Para cada agrupamento foram geradas diferentes redes e foi estimado o impacto financeiro da alocação dessa rede.

As análises foram feitas a partir de uma Heurística proposta para diminuir o tempo de execução das análises. A Heurística implementada ficará disponível para trabalhos futuros, com a possibilidade de se mudar as premissas e/ou os dados de entrada considerados nesse trabalho. A Heurística se mostrou eficiente, uma vez que, tem um tempo de execução na ordem de minutos, enquanto que a solução por exaustão chegava a ter tempo de execução de mais de um dia. Além disso, os resultados gerados com a heurística foram gerados também pela solução por exaustão, ambos geraram os mesmos resultados para todas as análises consideradas.

Foram analisados três tipos de rede para cada agrupamento, uma vez que, se desejava propor uma mudança gradual da malha aérea brasileira, até poder se alcançar a rede ótima, considerando as menores distâncias de rota. Conseguiu-se para os destinos Europeus e da América do Norte gerar novas redes que tiveram um impacto positivo, quando estimadas as economias de combustível.

Sabe-se que tem de se levar em conta a dificuldade operacional de se alocar um Hub. Existem vários fatores, passando desde a capacidade do aeroporto de operar como Hub até os demais custos envolvidos nas mudanças de rota, que dificultam uma realocação de rotas passando por um novo Hub. Todavia, as análises para cada um dos destinos da Europa e da América do Norte mostraram que se pode melhorar a concentração de voos e sistema de conexões, principalmente, concentrando os voos para a Europa em SBFZ e os voos para América do Norte em SBEG. Pois, as estimativas do impacto financeiro mostraram que essas duas medidas juntas geravam uma economia de combustível da ordem de 10% do Lucro Bruto da indústria.

5.2 Trabalhos Futuros

Nesse trabalho foi tomada a premissa que a origem do passageiro que embarcava em voos internacionais era proporcional à fatia de voos domésticos de cada aeroporto nacional. A origem do passageiro é importante na hora de compor a malha aérea vigente, podendo alterar a rede proposta pela otimização escolhida. Um possível trabalho futuro seria validar a origem dos passageiros nos aeroportos domésticos antes de fazerem suas conexões para os voos internacionais. Um estudo divulgado recentemente pela ANAC, o Brasil que voa [46], o levantamento mais completo sobre o transporte aéreo brasileiro já feito, revela tanto perfis de passageiros como as principais rotas. Esse estudo pode ser uma ferramenta para validar ou aprimorar as premissas feitas sobre origem de passageiros nesse trabalho.

Outro trabalho importante seria estimar o crescimento da demanda por voos internacionais por aeroportos e incluir esse crescimento no modelo utilizado, levando em conta assim o crescimento local em cada possível candidato a Hub.

O modelo utilizado considerou somente o custo de combustível na função objetivo. Um possível trabalho futuro seria enriquecer a função objetivo com os demais custos associados à alocação de um Hub, como mostrado na Figura 1. Podendo assim, fazer uma análise mais completa sobre o problema de localização de Hub.

No presente trabalho, foi estimado o impacto do preço do combustível por região na rede proposta pela Heurística. Todavia, só foi utilizado o preço por região. Um possível trabalho futuro seria estimar o impacto do preço do QAV por cidade nos resultados gerados. Pois, o preço por região próxima do aeroporto, pode favorecer alguns aeroportos que não foram incluídos nos resultados.

Por último, um possível trabalho futuro, seria validar a metodologia utilizada ou propor uma nova para estimar os valores referentes à economia de combustível. A metodologia utilizada por Fregnani [47], para a aeronave E190, pode ser replicada para o B777-300ER, aprimorando assim, a estimativa de economia de combustível.

REFERÊNCIAS

1. FARAHANI, Reza Zanjirani et al. Hub location problems: A review of models, classification, solution techniques, and applications. **Computers & Industrial Engineering**, v. 64, n. 4, p. 1096-1109, 2013.
2. ANAC. Anuário do transporte Aéreo, Dados Estatísticos e Econômicos, 2013. In: <http://www2.anac.gov.br/estatistica/anuarios.asp>
3. HAKIMI, S. Louis. Optimum locations of switching centers and the absolute centers and medians of a graph. **Operations research**, v. 12, n. 3, p. 450-459, 1964.
4. TOH, Rex S.; HIGGINS, Richard G. The impact of hub and spoke network centralization and route monopoly on domestic airline profitability. **Transportation Journal**, p. 16-27, 1985.
5. O'KELLY, Morton E. The location of interacting hub facilities. **Transportation science**, v. 20, n. 2, p. 92-106, 1986.
6. CAMPBELL, James F. A survey of network hub location. **Studies in Locational Analysis**, v. 6, n. 6, p. 31-49, 1994.
7. AYKIN, Turgut. Networking policies for hub-and-spoke systems with application to the air transportation system. **Transportation Science**, v. 29, n. 3, p. 201-221, 1995.
8. KLINCEWICZ, John G. Heuristics for the p-hub location problem. **European Journal of Operational Research**, v. 53, n. 1, p. 25-37, 1991.
9. CAMPBELL, James F.; O'KELLY, Morton E. Twenty-five years of hub location research. **Transportation Science**, v. 46, n. 2, p. 153-169, 2012.
10. O'KELLY, Morton 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.
11. CAMPBELL, James F. Hub location and the p-hub median problem. **Operations Research**, v. 44, n. 6, p. 923-935, 1996.
12. CAMPBELL, James F. Integer programming formulations of discrete hub location problems. **European Journal of Operational Research**, v. 72, n. 2, p. 387-405, 1994.
13. AYKIN, Turgut. The hub location and routing problem. **European Journal of Operational Research**, v. 83, n. 1, p. 200-219, 1995.
14. AYKIN, Turgut; BROWN, Gary F. Interacting new facilities and location-allocation problems. **Transportation Science**, v. 26, n. 3, p. 212-222, 1992.

15. DA GRAÇA COSTA, Maria; CAPTIVO, Maria Eugénia; CLÍMACO, João. Capacitated single allocation hub location problem—A bi-criteria approach. **Computers & Operations Research**, v. 35, n. 11, p. 3671-3695, 2008.
16. CAMPBELL, Ann Melissa; LOWE, Timothy J.; ZHANG, Li. The p-hub center allocation problem. **European Journal of Operational Research**, v. 176, n. 2, p. 819-835, 2007.
17. ERNST, Andreas T. et al. Uncapacitated single and multiple allocation p-hub center problems. **Computers & Operations Research**, v. 36, n. 7, p. 2230-2241, 2009.
18. KARA, Bahar Y.; TANSEL, Barbaros C. On the single-assignment p-hub center problem. **European Journal of Operational Research**, v. 125, n. 3, p. 648-655, 2000.
19. YAMAN, Hande; ELLOUMI, Sourour. Star p-hub center problem and star p-hub median problem with bounded path lengths. **Computers & Operations Research**, v. 39, n. 11, p. 2725-2732, 2012.
20. KARA, B. Y.; TANSEL, B. C. The single-assignment hub covering problem: Models and linearizations. **Journal of the Operational Research Society**, v. 54, n. 1, p. 59-64, 2003.
21. WAGNER, Bernd. Model formulations for hub covering problems. **Journal of the Operational Research Society**, v. 59, n. 7, p. 932-938, 2008.
22. ADLER, Nicole; HASHAI, Niron. Effect of open skies in the Middle East region. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v. 39, n. 10, p. 878-894, 2005.
23. CAMPBELL, James F.; ERNST, Andreas T.; KRISHNAMOORTHY, Mohan. Hub arc location problems: part I—introduction and results. **Management Science**, v. 51, n. 10, p. 1540-1555, 2005.
24. YANG, Ta-Hui. Stochastic air freight hub location and flight routes planning. **Applied Mathematical Modelling**, v. 33, n. 12, p. 4424-4430, 2009.
25. QU, Bo; WENG, Kerui. Path relinking approach for multiple allocation hub maximal covering problem. **Computers & Mathematics with Applications**, v. 57, n. 11, p. 1890-1894, 2009.
26. COSTA, Tiago FG; LOHMANN, Gui; OLIVEIRA, Alessandro VM. A model to identify airport hubs and their importance to tourism in Brazil. **Research in Transportation Economics**, v. 26, n. 1, p. 3-11, 2010.
27. MENOUE, Abdellah et al. Decision support for centralizing cargo at a Moroccan airport hub using stochastic multicriteria acceptability analysis. **European Journal of Operational Research**, v. 204, n. 3, p. 621-629, 2010.

28. KARIMI, H.; BASHIRI, M. Hub covering location problems with different coverage types. **Scientia Iranica**, v. 18, n. 6, p. 1571-1578, 2011.
29. LIN, Cheng-Chang; LIN, Jr-Yung; CHEN, Yin-Chieh. The capacitated p-hub median problem with integral constraints: An application to a Chinese air cargo network. **Applied Mathematical Modelling**, v. 36, n. 6, p. 2777-2787, 2012.
30. ÇETINER, Selim; SEPIL, Canan; SÜRAL, Haldun. Hubbing and routing in postal delivery systems. **Annals of Operations Research**, v. 181, n. 1, p. 109-124, 2010.
31. WANG, James J.; CHENG, Michael C. From a hub port city to a global supply chain management center: a case study of Hong Kong. **Journal of Transport Geography**, v. 18, n. 1, p. 104-115, 2010.
32. ISHFAQ, Rafay; SOX, Charles R. Intermodal logistics: the interplay of financial, operational and service issues. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 46, n. 6, p. 926-949, 2010.
33. 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, n. 1, p. 1-18, 2005.
34. CUNHA, Claudio B.; SILVA, Marcos Roberto. 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, n. 3, p. 747-758, 2007.
35. EISELT, Horst A. Locating landfills—Optimization vs. reality. **European Journal of Operational Research**, v. 179, n. 3, p. 1040-1049, 2007.
36. TAKANO, Kelly; ARAI, Makoto. A genetic algorithm for the hub-and-spoke problem applied to containerized cargo transport. **Journal of Marine Science and Technology**, v. 14, n. 2, p. 256-274, 2009.
37. CAMPBELL, James F. Hub location for time definite transportation. **Computers & Operations Research**, v. 36, n. 12, p. 3107-3116, 2009.
38. LIMBOURG, Sabine; JOURQUIN, Bart. Optimal rail-road container terminal locations on the European network. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 45, n. 4, p. 551-563, 2009.
39. CHOU, Chien-Chang. Application of FMCDM model to selecting the hub location in the marine transportation: A case study in southeastern Asia. **Mathematical and Computer Modelling**, v. 51, n. 5, p. 791-801, 2010.
40. LIN, Cheng-Chang; LEE, Shwu-Chiou. The competition game on hub network design. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 44, n. 4, p. 618-629, 2010.

41. VIDOVIĆ, Milorad et al. The p-hub model with hub-catchment areas, existing hubs, and simulation: A case study of Serbian intermodal terminals. **Networks and Spatial Economics**, v. 11, n. 2, p. 295-314, 2011.
42. VASCONCELOS, Adriano D.; NASSI, Carlos D.; LOPES, Luiz AS. **The uncapacitated hub location problem in networks under decentralized management**. *Computers & Operations Research*, v. 38, n. 12, p. 1656-1666, **2011**.
43. ANAC. Base de Voo Regular Ativo. Disponível em: <http://www2.anac.gov.br/vra/>. Acesso em: Maio de 2015.
44. GREAT CIRCLE MAPPER. Disponível em: <http://www.greatcirclemapper.net/>. Acesso em: Agosto de 2015.
45. PETROBRÁS, Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico. Disponível em: <http://www.br.com.br/wps/wcm/connect/0093880043a7ae538c958fecc2d0136c/fispq-avi-querosene-jeta1-antiestatica.pdf?MOD=AJPERES>. Acesso em: Novembro de 2015.
46. ANAC. O Brasil que voa. Disponível em: <http://www.aviacao.gov.br/obrasilquevoa/rotas.php>. Acesso em: Novembro de 2015.
47. **FREGNANI, J. A. T. G.; MÜLLER, Carlos; CORREIA, Anderson Ribeiro**. Um Modelo para Minimização dos Custos Totais de Abastecimento Considerando as múltiplas escalas das Aeronaves nas Rotas de uma Empresa Aérea Regional Brasileira. **Mimeo, 2007**.

FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO			
1. CLASSIFICAÇÃO/TIPO TC	2. DATA 17 de novembro de 2015	3. REGISTRO N° DCTA/ITA/TC-032/2015	4. N° DE PÁGINAS 78
5. TÍTULO E SUBTÍTULO: Estudo de alocação de Hubs para a demanda internacional.			
6. AUTOR(ES): Gabriel Cavalcante Marinho Lopes			
7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES): Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA			
8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR: Alocação de Hub, Demanda internacional, Conexões de rotas, Combustível, Heurística.			
9. PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO: Operações de linhas aéreas; Rotas aéreas; Redução de custos; Combustíveis; Programação heurísticas; Transportes.			
10. APRESENTAÇÃO: X Nacional Internacional ITA, São José dos Campos. Curso de Graduação em Engenharia Civil-Aeronáutica. Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Arnaldo Scarpel. Publicado em 2015.			
11. RESUMO: O aumento do número de voos internacionais, assim como o fato do custo de combustível ter se tornado o principal item de custo do transporte aéreo, tem levado as empresas aéreas a estudar tanto a sua frota para voos internacionais assim como as rotas por onde devem atuar. Nesse contexto, o Hub onde cada companhia aérea concentra seus voos é fundamental para torná-las mais competitivas, em um mercado de margem pequena, como é o de transporte aéreo. O presente trabalho de graduação objetivou a uma revisão das principais formulações e aplicações do problema de localização de Hubs, assim como a geração de uma série de análises para alocação de Hubs para voos internacionais com destino ou origem no Brasil. Sobre diferentes perspectivas, foi fornecida a melhor rota possível para cada agrupamento de países considerado, mas também foram gerados resultados preliminares, com premissas mais conservadoras, antes de chegar à rede ótima. Assim, pôde-se propor um passo-a-passo nas mudanças de rota, até chegar à melhor alocação, sobre as perspectivas consideradas. Alguns aeroportos, como o de Fortaleza, foram alocados como Hubs de maneira mais recorrente, tanto nas análises preliminares, assim como nas redes ótimas. Os valores financeiros de economia foram estimados para todas as redes propostas. Os resultados foram gerados via uma heurística que visava diminuir o tempo de execução das análises. Os resultados da heurística foram semelhantes aos gerados pela solução por exaustão, com um tempo de execução muito menor. A rotina ficará disponível para análises futuras com diferentes dados de entrada ou premissas.			
12. GRAU DE SIGILO: (X) OSTENSIVO () RESERVADO () SECRETO			