



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Planeamento Estratégico da Topologia das Redes Domésticas das Principais Companhias Aéreas dos E.U.A.

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Especialidade de Urbanismo, Transportes e Vias de Comunicação

Autor

Jorge André Vaz Cardoso

Orientador

Miguel Ângelo Cortês Gueifão dos Santos

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

Coimbra, Junho, 2014

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Professor Miguel Gueifão Santos por me ter dado a oportunidade de realizar esta dissertação e de trabalhar a seu lado. A sua orientação e o seu grande acompanhamento, juntos com o seu conhecimento e a sua grande personalidade, foram as maiores armas para o sucesso deste trabalho e uma grande motivação para mim. Agradeço igualmente aos restantes Professores do Departamento de Engenharia Civil pelos conhecimentos que me transmitiram ao longo destes anos.

Agradeço ao Professor César Trapote, em nome da Universitat Politècnica da Catalunya, pela sua partilha de conhecimento comigo e pela sua ajuda. Agradeço também aos Professores da Rzeszów University of Technology pela gratificante experiência que me proporcionaram.

Agradeço a ajuda, o apoio e toda a dedicação da minha família, acima de tudo à minha Mãe, ao meu Pai e aos meus Irmãos, bem como às suas famílias.

Um especial obrigado à Raquel por estar sempre a meu lado e partilhar comigo muitas aventuras.

Por fim, agradeço ao Rui, ao Tony, ao Zé, ao João, ao Miguel e ao André, pela sua amizade de sempre, e agradeço também, o apoio dos amigos e colegas que me acompanharam ao largo deste percurso académico, em especial ao Marcos, ao Lino, ao Mesquita, ao Rui e ao Diogo.

RESUMO

Depois da liberalização do transporte aéreo nos E.U.A. em 1978, este conheceu um grande e notável crescimento, tornando-se como um meio de transporte de extrema importância para a economia e para a sociedade. Um dos resultados dessa liberalização foi a adoção de topologias de rede do tipo hub-and-spoke por parte das companhias, que, num ambiente de competitividade, procuravam melhorar a eficiência das suas redes, reduzindo os seus custos operacionais. No âmbito desta dissertação é feita a modelação das redes domésticas das principais companhias aéreas através dos modelos de localização de hubs. Posteriormente é feita uma otimização destas redes de forma a minimizar os custos de operação, analisando assim se os hubs utilizados atualmente pelas companhias aéreas são os que proporcionam os menor custos para satisfazer a procura prevista para o ano de 2024. Os resultados obtidos indicam que redes ótimas da American Airlines, Delta Airlines, Jetblue Airlines, Southwest Airlines e U.S. Airways conduzem a um custo menor que o das redes atuais, enquanto que a rede atual da United Airlines é a rede ótima.

ABSTRACT

With the liberalization of the air transportation in the USA in 1978, it began to grow very rapidly and become extremely important to the economy and society. One of the results of the liberalization was the adoption of hub-and-spoke networks by the airlines, which, in a competitive environment, sought to improve the efficiency of their networks and reduce their operational costs. In this dissertation, we model the domestic networks of the main airlines of the USA by hub location models. Afterwards, we optimize the networks in order to minimize operating costs, thus analyzing whether the hubs currently used by the airlines are those that minimize cost for the demand projected in 2024. Results show that the optimal networks of American Airlines, Delta Airlines, JetBlue Airways, Southwest Airlines and U.S. Airways lead to lower operational cost when compared to the current networks. The only exception is the network of United Airlines, which is currently the optimal network.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
ÍNDICE.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE QUADROS	vii
SIMBOLOGIA	viii
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 METODOLOGIA DO TRABALHO	5
3 SISTEMA DE TRANSPORTE AÉREO DOS ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA	8
3.1 Companhias Aéreas	9
3.2 Rede de Aeroportos	10
4 MODELOS DE LOCALIZAÇÃO DE HUBS	14
4.1 Formulação Matemática dos Modelos.....	16
4.1.1 Modelo da p -hub mediana com política de centralização estrita e atribuição simples	18
4.1.2 Modelo da p -hub mediana com política de centralização estrita e atribuição múltipla	20
4.1.3 Modelo da p -hub mediana com política de centralização não estrita e atribuição simples.....	20
4.1.4 Modelo da p -hub mediana com política de centralização não estrita e atribuição múltipla.....	22
4.2 Exemplo de Aplicação.....	22
4.2.1 Dados.....	22

4.2.2 Resultados.....	23
5 DADOS	28
5.1 Conjunto de Nós	28
5.2 Distância entre Aeroportos	29
5.3 Procura.....	29
6 CALIBRAÇÃO DOS MODELOS	34
7 REDES ÓTIMAS	43
7.1 Resultados.....	43
7.1.1 American Airlines.....	45
7.1.2 Delta Airlines.....	46
7.1.3 JetBlue Airlines	47
7.1.4 SouthWest Airlines.....	47
7.1.5 United Airlines	48
7.1.6 U.S. Airways	48
7.2 Otimização com o modelo p -HM-AM/NE.....	49
8 CONCLUSÃO.....	54
9 BIBLIOGRAFIA	57
ANEXOS	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Rede point-to-point e rede hub-and-spoke.....	2
Figura 2 - Rede aérea da United Airlines em 1965 e 1989	3
Figura 3 - Aeroportos 'Large hubs' e aeroportos 'Medium hubs'.....	11
Figura 4 - Atribuição múltipla – política de centralização estrita	15
Figura 5 - Atribuição múltipla – política de centralização não estrita.....	15
Figura 6 - Resultado da aplicação do modelo p -HM - AS/E ao exemplo de aplicação	24
Figura 7 - Resultado da aplicação do modelo p -HM - AM/E ao exemplo de aplicação	25
Figura 8 - Resultado da aplicação do modelo p -HM - AS/NE ao exemplo de aplicação	26
Figura 9 - Resultado da aplicação do modelo p -HM - AM/NE ao exemplo de aplicação	27
Figura 10 - Conjunto dos nós considerados para o estudo da rede aérea dos EUA	31
Figura 11 - Distribuição da procura em cada aeroporto por companhia	33
Figura 12 - Cálculo dos fluxos pelas viagens com origem em cada aeroporto	34
Figura 13 - Relação entre o tráfego observado e o tráfego modelado nos aeroportos para as companhias aéreas em estudo.....	38
Figura 14 - Rede Atual da American Airlines	39
Figura 15 - Rede Atual da Delta Airlines	39
Figura 16 - Rede Atual da JetBlue.....	39
Figura 17 - Rede Atual da Southwest.....	40
Figura 18 - Rede Atual da United Airlines.....	40
Figura 19 - Rede Atual da U.S. Airways.....	40
Figura 20 - Rede Atual e Rede Ótima da American Airlines.....	45
Figura 21 - Rede Atual e Rede Ótima da Delta Airlines	46
Figura 22 - Rede Atual e Rede Ótima JetBlue Airlines	47
Figura 23 - Rede Atual e Rede Ótima da Southwest.....	48
Figura 24 - Rede Atual e Rede Ótima da US Airways	49
Figura 25 - Rede Ótima da JetBlue para o modelo p -HM - AM/NE.....	51
Figura 26 - Rede Ótima da Southwest para o modelo p -HM - AM/NE.....	51
Figura 27 - Rede Ótima da United Airlines para o modelo p -HM - AM/NE.....	51
Figura 28 - Rede Ótima da US Airways para o modelo p -HM - AM/NE.....	51

ÍNDICE DE QUADROS

Tabela 1- Principais companhias dos E.U.A. segundo o número de passageiros em voos domésticos (1.º Trimestre de 2013)	9
Tabela 2 - Percentagem de voos por aeroporto para cada companhia.....	13
Tabela 3- Coordenadas e número de partidas em cada centro - Instância de estudo	23
Tabela 4 - Matriz O/D para a instância de estudo	23
Tabela 5 - Conjunto dos aeroportos agregados por área metropolitana	30
Tabela 6 - Fluxos com origem em cada aeroporto para cada companhia.....	35
Tabela 7 - Resumo dos fatores de correlação entre os fluxos modelados e os fluxos observados	36
Tabela 8 - Fatores de correlação entre os fluxos modelados e os fluxos observados.....	37
Tabela 9 - Resultados da otimização das redes modeladas para cada companhia	44
Tabela 10 – Resultados da otimização das redes modeladas com o modelo p-HM-AM/NE...	50

SIMBOLOGIA

Conjuntos:

N - Conjunto de aeroportos, indexado a j, h, m, k .

Variáveis de decisão:

$X_{jhm k}$ - Variável binária. Assume o valor 1 se as viagens entre o nó j e o nó k passam pelos hubs h e m , por essa ordem, e 0 caso contrário ;

Y_h - Variável binária de localização. Assume o valor 1 se o nó h é hub, e 0 caso contrário;

V_{jh} - Variável binária. Assume o valor 1 se o nó j é atribuído ao hub em h , e 0 caso contrário ;

W_{jk} - Variável binária. Assume o valor 1 se existe serviço directo entre o nó j e o nó k , e 0 caso contrário ;

Parâmetros:

Q_{jk} - Procura/fluxo de viagens entre j e k ;

d_{jk} - Distância euclidiana entre j e k ;

p - Número de hubs a instalar ;

c_{jk} - Custo unitário de transportar um passageiro do aeroporto j ao k ;

α - Fator de desconto associado às viagens entre hubs ;

ω_{jk} - Variável binária. Assume o valor 1 se for permitida ligação directa entre o nó j e o nó k , e 0 caso contrário;

w_{min} - Número mínimo de passageiros para existir ligação directa entre spokes;

Outros:

φ_j - Latitude do nó j ;

ϑ_j - Longitude do nó j ;

T - Raio da Terra (6371 Km) ;

F_j - Fluxo real de viagens com origem no aeroporto j ;

G_j - Fluxo de viagens modelado com origem no aeroporto j .

1 INTRODUÇÃO

O transporte aéreo é um dos meios de transporte de maior relevância para a economia e para a sociedade. Segundo ATAG (2014), estima-se que em 2013 o impacto do transporte aéreo na economia global foi de 2,4 triliões de dólares e que 3,4% do PIB mundial é suportado por este sector. Com o aumento da população e do seu poder de compra, e com o desenvolvimento da economia, a procura por transporte aéreo cresceu significativamente, sendo responsável pelo transporte de 3 biliões de passageiros em 2013, o triplo dos passageiros transportados em 1985 e o dobro dos transportados em 1997.

A crescente e exigente procura foi acompanhada com um grande desenvolvimento do transporte aéreo, sendo atualmente a forma mais rápida de transporte de passageiros e mercadorias, com um grande conforto e segurança, e de uma forma bastante eficiente (Oxford Economics 2011). O transporte aéreo teve um desenvolvimento diferente nas várias zonas do mundo, quase sempre acompanhando a evolução do PIB dessas zonas e também as suas mudanças regulamentares e políticas (Ishutkina 2009). Na Europa Ocidental e na América do Norte, o pico de evolução do transporte aéreo ocorreu nas últimas décadas e atualmente encontra-se numa fase de maturação, caracterizado por um crescimento da procura a um menor ritmo, sendo que as maiores mudanças são a nível operacional. Por sua vez, as regiões que na última década têm vindo a desenvolver-se a um maior ritmo, nomeadamente a Ásia-Pacífico e o Médio Oriente, estão na sua fase de grande crescimento (Bonney and Hansman 2008).

O transporte aéreo nos EUA tem vindo a assumir uma importância muito significativa e é o país que mais cedo viu uma profunda evolução deste sector. Segundo a FAA (2011), a aviação civil é atualmente responsável por cerca de 5% do PIB do país, gera uma atividade económica de cerca de 1,3 triliões de dólares por ano e conta com 10 milhões de empregos associados a este sector. No ano de 2013, as companhias aéreas americanas serviram 743 milhões de passageiros em voos domésticos e internacionais (BTS 2014).

Na história da aviação civil dos EUA houve um acontecimento que foi a chave para a evolução de todo o sector da aviação como o conhecemos hoje: a ‘Airline Deregulation Act’, uma lei aprovada no ano de 1978, pelo Presidente Carter. Antes desta lei entrar em vigor, a aviação civil encontrava-se numa importante fase de crescimento, sendo pautada por novos avanços

tecnológicos que permitiram uma maior eficiência e segurança, e por novos avanços operacionais que conduziram a um crescimento da procura. Porém, o crescimento deste sector não era acompanhado pela entidade que o regulava, a administração central e o ‘Civil Aeronautics Board’, que, num ambiente bastante regulado, era responsável por definir as rotas, preços e frequências, adjudicando essas rotas às companhias aéreas, que raramente tinham liberdade para tomar iniciativas nesse campo (Shaw 1993). Com a ‘Airline Deregulation Act’, o governo retirou o controlo que tinha sobre este sector, deixando-o em total liberdade para as companhias aéreas nas suas tomadas de decisões, ficando expostas às forças dos mercados liberalizados, e assim, o sector passou a desenvolver-se num ambiente competitivo. As companhias eram livres e responsáveis por fazer mudanças nas suas operações de modo a otimizar o seu desempenho e o seu lucro, e, por outro lado, a competição de preços e reduções de custos produziam custos mais baixos aos passageiros, melhores serviços, e também, mais conforto e segurança. Esta mudança é a responsável pela existência nos dias de hoje de um sistema de transporte aéreo bastante eficiente e que oferece um melhor serviço a mais pessoas, a mais cidades e a preços muito baixos (Alderighi et al. 2007).

Um dos principais resultados da desregulação do sector da aviação nos EUA, e da consequente liberdade concedida às companhias aéreas para definirem as suas rotas, foi a evolução das suas redes de uma topologia do tipo *point-to-point* para o tipo *hub-and-spoke*, o que permitiu aumentar a eficiência e reduzir os custos de operação das companhias aéreas.

A topologia *point-to-point* (Figura 1) é caracterizada por ter os seus nós (aeroportos) todos interligados, i.e., se existe procura entre dois nós então haverá uma ligação entre eles. As redes *hub-and-spoke*, são redes constituídas por aeroportos do tipo hub, que vão servir de ponto de transbordo, e vão concentrar, não só o fluxo das viagens com origem e destino nesses aeroportos, mas também o fluxo proveniente de outros aeroportos (spokes), distribuindo esse fluxo para os vários destinos ou para um outro hub, para posteriormente dirigir-se aos destinos.

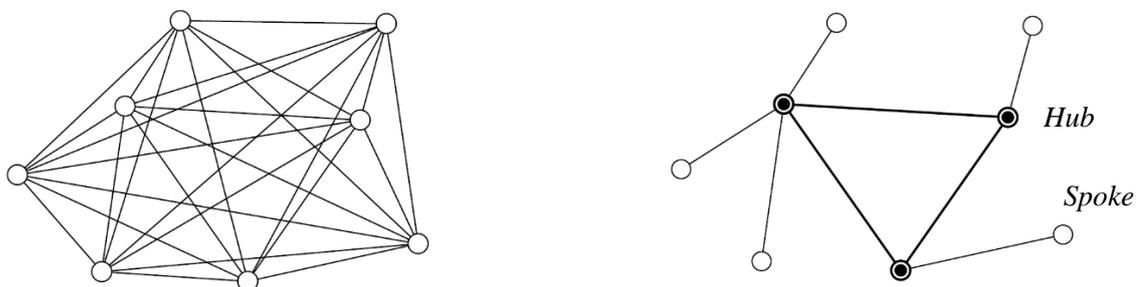


Figura 1 - Rede point-to-point (esquerda) e Rede hub-and-spoke (direita)

A topologia hub-and-spoke permite reduzir o número de ligações, que se efetuariam de forma direta, para um bastante menor número de ligações indiretas com uma ou duas paragens nos hubs (Daskin 1995). Nas ligações entre dois hubs, que reúnem fluxos de tráfego com diferentes

origens e diferentes destinos, surge uma grande vantagem: consegue-se nessas ligações um efeito das economias de escala, pois entre essas ligações poderão ser usados aviões de maior capacidade, e por outro lado, passa a haver maior frequência de serviço, levando a um custo mais baixo e a um melhor serviço para os passageiros, que nestas ligações entre hubs, terão várias opções de voos a várias horas facilitando as conexões para os seus destinos. Devido à agregação de fluxos (e consequentes economias de escala), e à diminuição de ligações, consegue-se diminuir o custo de operação da rede. Na Figura 2 pode ser visto, como exemplo, a evolução da rede aérea da United Airlines desde a fase da regulação aérea, de uma topologia point-to-point, até alguns anos depois, para uma topologia claramente hub-and-spoke.

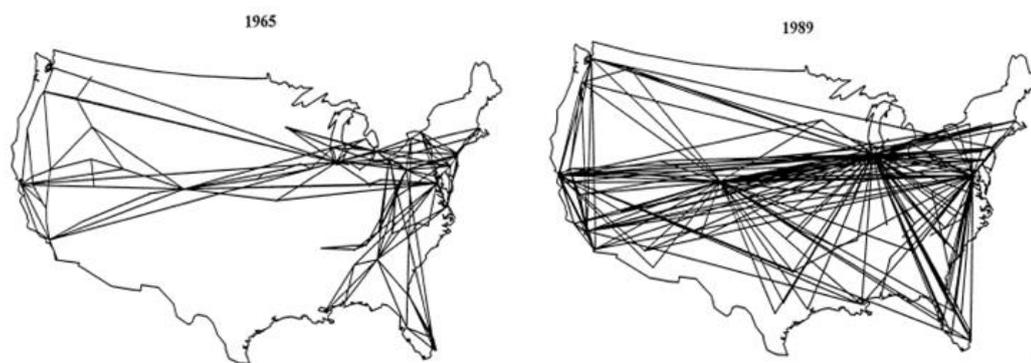


Figura 2 - Rede aérea da United Airlines em 1965 e 1989. (Source: United Airlines schedule guides, 1965 and summer 1989.)

A investigação das redes hub-and-spoke constituem atualmente uma importante área de estudo da investigação operacional, designada por problemática de localização de hubs. Em 1987, O'Kelly formulou e apresentou o primeiro modelo de otimização para as redes hub-and-spoke e, desde então, vários autores têm investigado este tema, extendendo a sua aplicabilidade a vários campos.

O objetivo do estudo descrito nesta dissertação é determinar a topologia futura das redes domésticas das principais companhias dos EUA. O estudo engloba a modelação das redes aéreas das companhias aéreas pelos modelos de localização de hubs, para então proceder-se à determinação das redes futuras. A determinação das redes futuras é feita sob o objetivo de minimização dos custos de operação da rede.

Esta dissertação está organizada em sete secções. Na Secção 2, é apresentada a metodologia do estudo. Na Secção 3 é analisado em detalhe o sistema aéreo dos EUA, e são indentificadas as principais companhias aéreas em operação, assim como os principais aeroportos (que concentram uma proporção importante do tráfego doméstico). Na Secção 4, são apresentados os modelos matemáticos de localização de hubs (*hub location models*), que constituem um

aspecto essencial na metodologia de estudo apresentada. Na Secção 5 é apresentado o procedimento adotado para a obtenção de dados para as companhias selecionadas para análise. Na Secção 6 é feita a calibração dos modelos para as companhias selecionadas. Na Secção 7 são apresentadas as redes ótimas de cada companhia aérea (obtidas a partir da resolução dos modelos), que são comparadas com as redes atualmente em operação (redes atuais). Finalmente, na Secção 8, são sintetizados os principais resultados obtidos no estudo.

2 METODOLOGIA DO TRABALHO

Alguns estudos desenvolvidos anteriormente analisam a topologia das redes das principais companhias dos EUA. Shaw (1993), por exemplo, estudou os hubs das redes de algumas companhias e, através das suas intensidades de tráfego, analisou como estes influenciam a rede. Bania et al. (1998), por sua vez, fez um estudo mais abrangente e completo da rede aérea dos EUA. Este considerou as redes das 13 maiores companhias e analisou a cobertura de 100 áreas metropolitanas, a sua escala operacional e a estrutura das suas redes, a localização dos hubs, e a competitividade entre as companhias aéreas.

O estudo descrito nesta dissertação, além de ter sido realizado com dados atuais (2013), contou com análises que não foram consideradas em estudos anteriores, nomeadamente a otimização das redes de modo a minimizar os custos operacionais de cada uma das companhias. Este estudo centrou-se na rede doméstica dos EUA (ou seja, apenas voos com origem e destino no país).

A metodologia de estudo desenvolvida está organizada em quatro fases:

- **Fase I: Estudo dos modelos de localização de hubs.** Esta fase da metodologia está presente na Secção 4 da dissertação. Nesta secção é feita uma pequena revisão dos modelos descritos na literatura, e são selecionados quatro modelos a incorporar no estudo, para os quais é apresentada a sua formulação matemática. A descrição das formulações dos modelos é acompanhada pela sua aplicação a um pequeno exemplo hipotético de forma a ilustrar a sua aplicabilidade.
- **Fase II: Obtenção de dados para as principais companhias dos E.U.A..** Esta fase da metodologia está presente na Secção 5 da dissertação. Nesta secção são analisados e tratados os dados necessários para pôr em prática os modelos selecionados. As companhias aéreas selecionadas para análise, assim como os aeroportos considerados, são descritos na Secção 3, aquando da descrição do sistema de transporte aéreo dos EUA.
- **Fase III: Calibração dos modelos para as companhias aéreas selecionadas.** Esta fase da metodologia está presente na Secção 6 da dissertação. Nesta secção vão ser usados os dados obtidos na fase 2 da metodologia, para assim seleccionar o modelo que fornece

resultados mais próximos das redes das principais companhias dos EUA. A seleção dos modelos que mais se ajustam a cada companhia é feita a partir da determinação dos parâmetros dos modelos que permitem um melhor ajuste entre os fluxos modelados e observados nas redes.

- **Fase IV: Determinação das redes ótimas das companhias aéreas.** Esta fase da metodologia está presente na Secção 7 da dissertação. Nesta secção são apresentadas as redes ótimas de cada companhia aérea (obtidas a partir da resolução dos modelos que mais se ajustam a cada companhia), que são comparadas com as redes atualmente em operação (redes atuais).

A metodologia desenvolvida neste estudo assenta em algumas simplificações, inerentes aos modelos selecionados para análise, e também aos dados considerados.

Os modelos de localização de hubs determinam as localizações de um número (dado) de hubs que minimizam os custos de operação (custos de servir a procura). O número máximo de hubs a localizar poderia não ser considerado se se considerasse um custo inerente à realocação dos hubs existentes. Este custo de instalação é de difícil determinação, mas deveria, contudo, ser considerado para efeitos de um planeamento rigoroso da rede futura das companhias. Por outro lado, foi admitido que serão localizados no futuro o mesmo número de hubs em operação atualmente.

Os modelos de localização considerados no estudo prevêm a possibilidade de se considerarem restrições de capacidade nos aeroportos, mas estas não foram consideradas devido à dificuldade em se obter os valores de capacidade. As restrições de capacidades são de grande importância, sobretudo nos hubs, onde é concentrado um maior fluxo de tráfego. É, portanto, admitido que os aeroportos serão providos de capacidade suficiente para satisfazer a procura futura.

A otimização das redes futuras de cada companhia aérea foi feita de forma independente. Isto é, na obtenção da rede ótima de cada companhia, não foram considerados os resultados obtidos para as outras companhias. Está é um hipótese forte do estudo, na medida que é de esperar que cada companhia ajuste as suas operações face às alterações levadas a cabo pelas suas concorrentes. No entanto, esta análise não pôde ser conduzida uma vez que sai do âmbito dos modelos de localização de hubs. Essa análise só poderia ser levada a cabo através de modelos mais complexos, nomeadamente pelos denominados modelos baseados em agentes.

O estudo descrito nesta dissertação foi feito para uma rede constituída por 28 áreas metropolitanas, onde estão localizados os 40 aeroportos de maior relevância nos EUA. Não foram considerados os aeroportos secundários, de importância regional, que servem os

aeroportos principais. A consideração dos aeroportos secundários reveste-se de alguma importância, nomeadamente no planeamento das redes das companhias que servem tráfego regional, mas isso conduziria a uma grande dificuldade na resolução dos modelos.

Finalmente, importa referir que o estudo teve por referência a procura atualmente servida pelas companhias aéreas. A procura atual está ajustada à rede existente, e é expectável que uma mudança na rede das companhias aéreas conduza a uma mudança na procura captada (por exemplo, a localização de um novo hub por parte de uma companhia pode conduzir, potencialmente, a um aumento da sua cota de mercado das viagens de e para o hub). Contudo, a resposta da procura à abertura de novos hubs é difícil de captar pelos modelos de localização de hubs, e, como tal, não foi considerada.

3 SISTEMA DE TRANSPORTE AÉREO DOS ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA

A aviação civil representa um importante sector na economia dos EUA. Segundo a BTS (2014), o ano de 2013 verificou um total de 645,6 milhões de passageiros que viajaram nas companhias aéreas norte americanas e apenas na rede doméstica dos EUA, o que representou uma subida de 0,5% em comparação com o ano anterior. Esse crescimento tem mostrado-se relativamente constante desde o ano de 2008, quando, devido à recessão económica, o crescimento do número de passageiros teve uma quebra. Apesar de o número de passageiros aumentar em relação ao ano anterior, em 2013 o número de voos teve uma redução de 1,6%, sendo que foram operados 831,19 milhares de voos nesse ano.

O transporte aéreo nos EUA encontra-se regulado e supervisionado pela FAA – Federal Aviation Administration, a autoridade nacional para a aviação nos EUA. Esta agência é tutelada pelo departamento de transportes dos Estados Unidos (United States Department of Transportation - DOT) e tem como principais funções a regulamentação da aviação civil, desde a certificação dos pilotos à fiscalização das aeronaves, o controlo do tráfego aéreo e a regulamentação da rede de aeroportos. Outra parte integrante do DOT é a “Research and Innovative Technology Administration – RITA”, que se encarrega dos programas de investigação e desenvolvimento do sistema de transportes nacional, que integra, por sua vez, o gabinete de estatística dos sistemas de transportes (Bureau of Transportation Statistics), onde estão reunidos os elementos estatísticos preponderantes para a investigação deste trabalho que serão mais tarde apresentados.

Nesta secção são descritas as principais companhias aéreas dos EUA que operam voos domésticos e são analisadas as companhias que foram seleccionadas para o estudo aqui descrito. Posteriormente, são analisados os principais aeroportos que são considerados pelo NPIAS (“National Plan of Integrated Airport Systems”), e são analisados os aeroportos da rede de maior relevância no tráfego doméstico da rede dos EUA por parte das companhias seleccionadas.

3.1 Companhias Aéreas

Para efeitos estatísticos da FAA, são consideradas companhias aéreas de relevância nacional aquelas que têm uma receita operacional anual acima dos 20 milhões de dólares. Segundo este critério, existem 24 companhias aéreas¹ de relevância operando na rede aérea dos EUA. Segundo BTS (2014), as 10 companhias que mais passageiros transportaram na rede aérea são as responsáveis por 81,4% de todo o tráfego da rede. Como pode ser corroborado pela Tabela 1, praticamente todo o tráfego existente é servido por um pequeno número de companhias aéreas.

Tabela 1- Principais companhias dos E.U.A. segundo o número de passageiros em voos domésticos (1.º trimestre de 2013)

	Total Passageiros	(%)	
Southwest Air.	22196870	22.26%	
Delta Airlines	13039440	13.08%	
United Airlines	9730580	9.76%	
American Air.	9199930	9.23%	
US Airways	7731380	7.75%	
JetBlue Air.	5583940	5.60%	$\Sigma = 67.68\%$
ExpressJet Air.	4131160	4.14%	
Skywest A.	3553940	3.56%	
AirTran Air.	3189400	3.20%	
Alaska Air.	2844380	2.85%	$\Sigma = 81.44\%$
Outras	18502700	18.56%	

O estudo desta dissertação incidiu em 6 companhias que foram consideradas as mais importantes em valores de tráfego. A Southwest Airlines é, sem dúvida, a companhia responsável pela maioria dos voos domésticos nos EUA (22,26%), seguindo-se a Delta Airlines, que é a companhia que mais passageiros movimenta na rede aérea na sua totalidade (rede doméstica mais rede internacional). Apenas essas duas companhias são responsáveis por mais de um terço dos passageiros de toda a rede aérea. As companhias aéreas que se seguem, em relação ao número de passageiros transportados, são a United Airlines e a American Airlines, e ambas são responsáveis por quase 10% das viagens da rede aérea dos EUA cada uma, sendo por isso preponderantes serem consideradas para o estudo. No caso da US Airways, que se segue com quase 8%, também deve de ser considerada pela sua importância e pelo facto de estar no processo de fusão com a American Airlines. A JetBlue ainda representa quase 6% do

¹ Dentro das 24 companhias consideradas, existem algumas que apesar da fusão com outras companhias continuam a reportar os seus dados estatísticos e financeiros por separado ao Estado, como por exemplo, a Southwest e a AirTran, ambas de relevância, fundiram-se em 2012 mas ainda reportam separadamente.

tráfego da rede aérea dos EUA, e a seguinte, a ExpressJet é uma companhia que funciona na base de aluguer de aeronaves a outras companhias. Considerou-se a JetBlue a última das companhias a ser considerada, sendo que as seguintes seguem com valores já baixos (menos de 5% do tráfego total), não sendo, por isso, incluídas neste estudo.

Com estas 6 companhias consegue-se uma amostra que representa 68% da rede aérea dos EUA. As rede aéreas e o tráfego destas 6 companhias serão as posteriormente estudadas e analisadas.

3.2 Rede de Aeroportos

A rede de aeroportos dos EUA encontra-se bem definida e consolidada por um plano que identifica todas as infraestruturas adjacentes ao transporte aéreo. O NPIAS é um plano nacional que cobre 5 anos fiscais, é elaborado pela FAA, e tem como objetivo o financiamento e desenvolvimento dos aeroportos mais relevantes do sistema de transportes. Este plano identifica as várias classes de aeroportos existentes e regula a atribuição de fundos a estes para o seu desenvolvimento e para futuros projetos.

No último relatório do NPIAS, que engloba os 5 anos fiscais entre 2013 a 2017, apresentado ao congresso dos EUA, são apresentados os aeroportos que são identificados (e classificados) como de especial significância para o sistema de transporte aéreo nacional e, por isso, abrangidos por este plano. O sistema de transportes dos E.U.A é composto por um total de 19.786 aeroportos, sendo que destes, apenas 5.171 são de uso público. Dos equipamentos públicos, 65% destes (3.355) são considerados aptos e que cumprem com todos os critérios para serem abrangidos pelo NPIAS, de entre eles aeroportos afetos à aviação civil.

Uma das componentes do NPIAS é a classificação hierárquica dos equipamentos que abrange segundo o seu uso, para assim, considerar um investimento adequado a cada categoria. Para este trabalho importa analisar os aeroportos com serviço comercial (499 aeroportos), que são classificados como primários (mais de 10.000 passageiros por ano) e não primários (entre 2.500 a 10.000 passageiros por ano). Existem, na rede de aeroportos considerada pelo NPIAS, 378 aeroportos primários de serviço comercial. Estes aeroportos são sujeitos a uma classificação, dependendo da percentagem de passageiros que são servidas nesse aeroporto, proposta no plano como²:

² O uso do termo 'hub' na classificação proposta pela FAA no NPIAS, para os diferentes aeroportos, é meramente representativo, não tendo o real significado técnico de um 'hub' de uma rede hub-and-spoke.

Para cada uma das seis companhias aéreas consideradas, segundo os dados do primeiro trimestre de 2013 (BTS T-100 Domestic Market), foram analisados os valores de tráfego em cada um dos aeroportos da rede do NPIAS, obtendo assim, os aeroportos com maior número de passageiros para cada uma das companhias. Com esses dados, foram selecionados os aeroportos que tinham uma importância em comum com as companhias e conseguiam representar as suas diferentes redes. Os aeroportos escolhidos e a respetiva percentagem de voos, bem como os que são considerados hubs, por cada companhia estão apresentados na tabela que se segue (Tabela 2).

Como seria de esperar, os aeroportos considerados pelo NPIAS como ‘Large Hubs’ (que representam pelo menos 1% do total de tráfego da rede cada) são de extrema importância para ambas as cinco companhias aéreas, concentrando de uma forma geral, grandes percentagens de viagens para as companhias. Pode-se afirmar que os 29 ‘Large hubs’ foram considerados para a rede aeroportos que vai ser alvo da aplicação prática deste trabalho e, junto com estes, os considerados ‘Medium hubs’ também mostraram ser de especial importância, embora alguns fossem mais relevantes para umas companhias que para outras, o que levou a uma análise mais crítica destes. De entre estes, apenas os que mostravam ser igualmente relevantes para as companhias e relevantes a nível do tráfego total desse mesmo aeroporto foram considerados para a rede de aeroportos. Importa também referir que existem algumas exceções: alguns aeroportos de baixo tráfego que eram importantes apenas para uma dada companhia, que não foram considerados.

Como resultado, foram considerados 40 aeroportos para a rede a ser considerada para a aplicação prática deste trabalho. Esta amostra de 40 aeroportos a considerar consegue representar bastante bem a rede de cada uma das 6 companhias, representando entre 75 a 80% do tráfego total de cada uma das companhias.

Com estes dados é possível concluir acerca das diferentes configurações de redes aplicadas pelas companhias aéreas consideradas. A Southwest Airlines é uma conhecida companhia de baixo custo (*low cost*) que opera essencialmente com uma rede *point-to-point*. As percentagens das viagens dessa companhia para os diferentes aeroportos são bastante próximas e apenas 38% das viagens estão adjacentes aos seus 9 hubs, o que indica que não existem aeroportos de grande referência e que concentrem grande parte das viagens (típico das ligações *hub-hub*). Por outro lado, nas outras 5 companhias já se denotam características de uma rede *hub-and-spoke*. Nos hubs considerados pelas companhias já existem grandes concentrações de viagens (a United Airlines, por exemplo, nos seus 6 hubs concentra metade das suas viagens), sendo que as maiores percentagens distribuem-se em alguns poucos aeroportos e nos restantes, existem percentagens residuais (os *spokes*).

Tabela 2 - Percentagem de voos por aeroporto para cada companhia

Cód IATA	Aeroporto	NPIAS Cl.	Viagens em cada aeroporto (%)					
			Delta Airl.	United Airl.	American Airlines	US Airws	Southwest Airlines	JetBlue Air.
ATL	Atlanta: Hartsfield-Jackson	L	12.08	0.17	0.84	1.68	0.79	0.00
AUS	Austin: Bergstrom International	M	0.52	0.69	1.79	0.25	1.65	1.16
BNA	Nashville: Nashville International	M	0.59	0.07	0.82	0.36	2.02	-
BOS	Boston: Logan International	L	1.73	2.71	2.50	4.22	0.79	13.71
BWI	Baltimore: Washington Int.	L	1.24	0.86	0.72	1.56	3.84	0.48
CLT	Charlotte: Charlotte Douglas Int.	L	0.90	0.16	0.46	6.71	0.00	-
DAL	Dallas: Dallas Love Field	M	0.02	0.02	0.00	-	2.87	-
DCA	Washington: Ronald Reagan	L	1.53	1.30	2.12	4.38	0.14	2.25
DEN	Denver: Denver International	L	1.33	6.46	1.17	1.46	4.41	0.51
DFW	Dallas/Fort Worth: International	L	0.85	0.73	14.67	2.16	-	0.43
DTW	Detroit: Detroit Metro Wayne	L	5.51	0.18	0.49	0.99	0.64	-
EWR	Newark: Newark Liberty Int.	L	0.58	9.04	0.77	1.70	0.53	3.05
FLL	Fort Lauderdale: Hollywood Int.	L	2.59	1.95	1.48	2.72	2.16	8.30
HOU	Houston: William P Hobby	M	0.19	0.00	0.07	-	3.33	0.25
IAH	Houston: George Bush Interc.	L	0.39	6.86	0.73	1.76	-	-
JFK	New York: John F. Kennedy Int.	L	3.19	1.07	3.55	1.00	-	14.87
LAS	Las Vegas: McCarran Int.	L	2.55	2.95	2.23	2.22	6.51	1.89
LAX	Los Angeles International	L	3.42	5.59	6.56	2.39	3.58	1.76
LGA	New York: LaGuardia	L	4.03	1.85	3.86	2.91	0.59	3.32
MCI	Kansas City International	M	0.70	0.11	0.69	0.62	1.87	-
MCO	Orlando International	L	3.86	3.20	2.05	3.63	3.83	8.65
MDW	Chicago: Midway International	L	0.28	0.00	0.00	0.00	4.92	-
MIA	Miami: Miami International	L	1.72	1.02	7.65	1.21	-	0.02
MSP	Minneapolis: St Paul International	L	5.49	0.61	0.64	1.35	0.75	-
MSY	New Orleans: Louis Armstrong Int.	M	1.20	1.23	0.75	0.70	1.60	0.53
OAK	Oakland: Metropolitan Int.	M	0.18	0.00	0.00	0.25	2.98	0.78
ORD	Chicago: O'Hare International	L	0.73	7.99	8.59	2.27	-	0.54
PBI	West Palm Beach International	M	1.30	0.90	0.62	1.31	0.48	3.82
PHL	Philadelphia International	L	1.08	1.07	0.84	9.63	1.15	-
PHX	Phoenix: Sky Harbor Int.	L	1.68	1.71	1.49	8.93	4.94	0.36
RSW	Fort Myers: Southwest Florida	M	1.78	1.03	0.75	1.46	0.74	2.60
SAN	San Diego International	L	1.23	2.01	1.35	1.41	3.16	0.54
SEA	Seattle: Tacoma International	L	1.55	2.08	1.12	1.06	1.23	0.79
SFO	San Francisco International	L	1.59	8.32	2.73	1.86	1.59	2.13
SJC	San Jose : Norman Y. Mineta Int.	M	0.20	0.33	0.65	0.51	2.15	0.12
SLC	Salt Lake City International	L	3.40	0.32	0.45	0.75	1.26	0.60
SMF	Sacramento International	M	0.28	0.62	0.42	0.54	2.23	0.49
SNA	Santa Ana: John Wayne Airport	M	0.57	1.46	1.28	0.64	1.79	0.00
STL	St. Louis: Lambert International	M	0.71	0.18	1.77	0.56	2.13	0.00
TPA	Tampa International	L	2.24	1.86	1.32	2.68	2.51	2.69
% do total de viagens			75.04	78.68	80.01	79.83	75.16	76.67

 Aeroporto Hub da companhia

i – Classificação do aeroporto pelo NPIAS: (L) – Large Hub ; (M) Medium hub

4 MODELOS DE LOCALIZAÇÃO DE HUBS

A base deste estudo assenta nos modelos matemáticos de localização de hubs (Hub Location Models), os quais são usados para modelar as redes aéreas das principais companhias dos EUA. Nesta secção são apresentados os modelos de localização de hubs que foram objeto de estudo desta dissertação, sendo que, numa primeira instância é feita uma pequena revisão da literatura existente sobre este tema e os estudos que foram efetuados no seu âmbito. Posteriormente é apresentada a formulação utilizada para cada um dos modelos utilizados e é apresentada uma pequena instância de estudo que servirá para testar os modelos que são apresentados. Por fim, são comentados os resultados da aplicação da instância de estudo e as conclusões que foram retiradas com esse estudo.

O desempenho de uma rede hub-and-spoke está diretamente relacionado com dois aspetos: a localização dos hubs e a forma como as atribuições são feitas dos spokes aos hubs. Existem vários modelos que consideram diferentes tipos de atribuição e também modelos com diferentes objetivos (que não seja o de minimizar o custo total). Os modelos mais comuns e pertinentes para as companhias aéreas são os modelos de custo médio: onde o objetivo dos modelos é minimizar os custos totais (de transporte) na rede. Estes modelos vão ser os modelos aplicados no âmbito desta dissertação, cujo objetivo vai assentar na minimização dos custos das redes de cada uma das companhias. Existem outros tipos de modelo, como os modelos de custo máximo, onde o objetivo já pode passar por minimizar o maior custo entre hubs, e como os modelos de maximização da cobertura, cujo objetivo é o da maximização da procura servida pelos hubs.

A investigação de modelos de localização de hubs começou com uma primeira formulação matemática de um modelo inteiro quadrático proposta por O’Kelly (1987), que tratava da topologia de atribuição de spokes a hubs conhecida como atribuição simples (Figura 1). Num modelo p -hub mediana de atribuição simples, é considerado que cada spoke apenas pode ser atribuído a um hub, e tinha como objetivo minimizar o custo total das viagens da rede. O’Kelly, além da formulação do problema, faz também uma análise comparativa entre os custos de viagem entre as redes hub-and-spoke e as redes point-to-point e analisa outra vantagem deste tipo de redes, utilizada nas formulações desta dissertação: os fluxos das ligações entre hubs vão ser muito maiores que nas ligações spoke-hub. Assim, O’Kelly considerou uma associação com as economias de escala, associadas a este sistema de transporte, a estas ligações que

apresentavam um maior fluxo. Os custos de operação nas ligações entre hubs serão menores com a possibilidade de, por exemplo, utilizar aviões de maiores capacidades, sendo assim, essas ligações são associadas com um fator de desconto que torna essas viagens mais baratas, favorecendo assim as viagens entre hubs e diminuindo as atribuições.

Os avanços mais importantes neste campo da investigação operacional foram, sem dúvida, a linearização dos modelos de localização de hubs que, até então, eram resolvidos por aproximações baseadas em métodos heurísticos. A aplicação da programação linear neste campo conseguiu encontrar soluções inteiras para a localização de hubs. Campbell (1994) começou por usar a programação linear para encontrar soluções ótimas para resolver este tipo de problemas. Mais tarde, O’Kelly et al. (1996), com algumas modificações a este modelo, conseguiram uma versão compacta do modelo que deu soluções inteiras para os problemas de localização de hubs de pequenas dimensões (até 25 nós). Ernst & Krishnamoorthy (1996) formularam uma versão com base na anterior criada por O’Kelly et al. (1996) em que, retirando algumas variáveis, conseguiram criar um modelo que importava um menor esforço computacional.

Campbell (1994) formulou pela primeira vez o conhecido modelo p -hub mediana de atribuição múltipla (Figura 4). A principal diferença deste modelo, em relação ao modelo de atribuição simples, é o facto de que este permite a cada spoke ser atribuído a mais que um hub. Ernst & Krishnamoorthy (1998), uma vez mais, reduzindo algumas variáveis, apresentaram uma nova formulação mais eficiente do modelo de atribuição múltipla que conseguia tratar problemas de maiores dimensões e reduzir o esforço computacional dos seus cálculos.

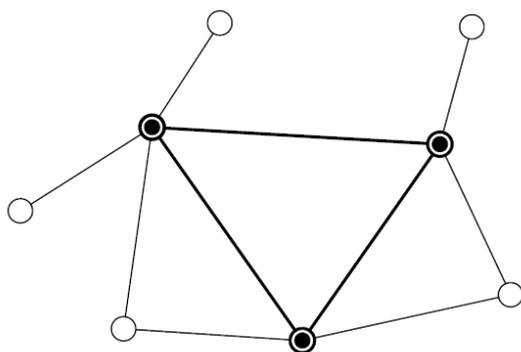


Figura 4 - Atribuição múltipla – política de centralização estrita

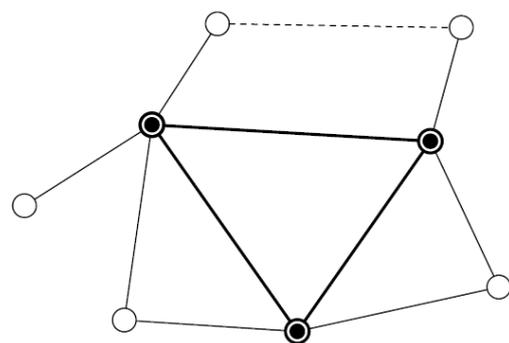


Figura 5 – Atribuição múltipla - Política de centralização não estrita

Aykin (1995) criou um importante conceito que também irá ser posto em prática nesta dissertação: o conceito de políticas de centralização nas redes hub-and-spoke. Aykin considera que existem dois tipos de políticas de centralização nas atribuições dos modelos: a política de

centralização estrita e a política de centralização não estrita. A política de centralização estrita é característica dos modelos apresentados anteriormente, que nos dizem que numa rede hub-and-spoke, cada spoke tem que ser obrigatoriamente atribuído a um hub. Por sua vez, a política de centralização não estrita considera que, além das atribuições hub-spoke, os modelos podem ainda ter atribuições diretas entre dois spokes se a procura assim o justificar (Figura 5). Este conceito tanto pode ser aplicado nos modelos de atribuição simples como nos modelos de atribuição múltipla. Na sequência deste trabalho, Jaillet et al. (1996) apresentaram uma nova versão deste modelo em que já entravam com outros parâmetros nos modelos, como por exemplo, o tipo de avião e o número de ligações entre cada nó.

4.1 Formulação Matemática dos Modelos

Para esta dissertação, de entre os modelos atrás apresentados, foram estudados os modelos de custo médio, nomeadamente os modelos p -hub mediana de atribuição simples, de atribuição múltipla e o modelo de política de centralização não-estrita, que pode ser aplicado com atribuição simples e múltipla.

O modelo p -hub mediana com atribuição simples estudado foi a formulação proposta por Ernst & Krishnamoorthy (1996), onde é apresentada uma formulação linearizada e compacta do modelo original. Neste modelo assume-se que cada spoke é atribuído a apenas um hub e não são permitidas viagens diretas entre spokes, logo, está inerente a este modelo uma política de centralização estrita.

No caso do modelo p -hub mediana com atribuição múltipla, foi utilizado o modelo estudado, e também formulado linearmente, por Ernst & Krishnamoorthy (1998). A principal diferença com o modelo de atribuição simples é o facto de cada centro poder ser servido por mais que um hub. Com este aumento de flexibilidade na rede, este modelo pretende caminhar para soluções com custos menores. Esta diminuição no custo total da viagem deve-se ao facto de que um spoke j , tendo a opção de poder ser atribuído a vários hubs, vai tentar minimizar o seu custo de viagem com essa flexibilidade entre as opções que tem. Numa viagem de j com destino ao hub m , passando por um hub h , as economias de escalas entre h e m podem não ser relevantes e pode ter um custo menor que o spoke j seja diretamente atribuído ao hub m . O mesmo passa com as viagens com escala (1-stop e 2-stop), enquanto que no modelo de atribuição simples um passageiro de um spoke j apenas pode ser atribuído a um único hub h e, apenas posteriormente, é atribuído a um dos hubs de forma a minimizar o custo da viagem para chegar ao spoke de destino. No modelo de atribuição múltipla, este passageiro a sair do spoke j já vai minimizar o custo aquando a atribuição ao primeiro hub de entre as opções que tem. Neste modelo também

está inerente uma política de centralização estrita, logo, não são permitidas viagens diretas entre os spokes.

O modelo p -hub mediana com atribuição simples e com política de centralização não estrita, como é característico da atribuição simples, assume que cada spoke é atribuído a apenas um hub. Neste modelo, e à diferença do primeiro modelo mencionado, já é considerada uma política de centralização não estrita, que permite a hipótese de poder existir, quando a procura o justifique, ligações entre spokes. O modelo que foi utilizado e estudado para a aplicação da política de centralização não estrita foi o modelo formulado por Aykin (1995). Esta flexibilidade permite o modelo atingir custos menores que o modelo de atribuição simples com política de centralização estrita pelo facto de que, a possibilidade de haver ligações entre spokes quando há uma grande procura entre eles, pode levar a custos menores uma viagem direta (apesar de não ter nenhuma economia de escala tem uma menor distância) que uma viagem a passar pelos hubs.

Por fim, o modelo p -hub mediana com atribuição múltipla e com política de centralização não estrita, junta a possibilidade de um spoke poder ser atribuído a mais que um hub, característica da atribuição múltipla, e a possibilidade de, quando a procura o justifica, haver ligações diretas entre spokes, da política de centralização não estrita. Assim sendo, conseguimos um modelo que permite 3 possibilidades de serviço: serviços diretos, serviços 1-hub-stop e 2-hub-stop. Teoricamente, este é o modelo que potencialmente permite atingir custos totais menores da rede, pelo facto de juntar as duas vantagens, já referidas, da atribuição múltipla e da política de centralização não estrita, sendo o modelo mais flexível na procura de atribuições que levem a uma minimização dos custos.

Para formular estes modelos é necessário definir os seguintes conjuntos, variáveis e parâmetros:

Conjuntos:

$N = \{1, 2, \dots, N\}$ – Conjunto de aeroportos;

Variáveis de decisão:

$X_{jhm k} \begin{cases} 1 & \text{se as viagens entre o nó } j \text{ e o nó } k \text{ passam pelos hubs } h \text{ e } m, \text{ por essa ordem;} \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases}$

$Y_h \begin{cases} 1 & \text{se o nó } h \text{ é um hub} \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} : \text{variável binária de localização.}$

$$V_{jh} \begin{cases} 1 & \text{se o nó } j \text{ é atribuído ao hub em } h; \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

$$W_{jk} \begin{cases} 1 & \text{se existe serviço directo entre o nó } j \text{ e o nó } k \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Parâmetros:

Q_{jk} – Procura de viagens entre um aeroporto j e um aeroporto k ;

d_{jk} – Distância entre um aeroporto j e um aeroporto k ;

c_{jk} – Custo de transportar um passageiro de um aeroporto j a um aeroporto k . Custo unitário por passageiro e por quilómetro, proporcional à distância;

p – Número de hubs a considerar;

$\alpha - \{ 0 < \alpha \leq 1 \}$ Fator de desconto aplicado às ligações entre hubs, devido aos efeitos das economias de escala;

$$\omega_{jk} \begin{cases} 1 & \text{se for permitida ligação directa entre o nó } j \text{ e o nó } k; \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

Para a formulação de todos os modelos apresentados e para todo o trabalho feito no âmbito desta tese, desde a aplicação da instância de estudo à modelação das redes e posterior otimização, foi utilizado o software FICO® Xpress Optimization Suite que determina uma solução ótima pelo método *Branch and Bound*.

4.1.1 Modelo da p -hub mediana com política de centralização estrita e atribuição simples

Para o modelo de atribuição simples com política de centralização estrita, designado abreviadamente por modelo p -HM-AS/E, é apresentada uma nova formulação feita com base no modelo apresentado por Ernst & Krishnamoorthy (1996), e nos modelos formulados por Aykin (1995).

O objetivo deste modelo é a minimização do custo total de transporte, composto pelas viagens dos spokes para os hubs e das viagens entre os hubs, instalando p hubs e considerando que cada spoke apenas pode ser atribuído a um hub.

O modelo p -HM-AS/E pode ser escrito da seguinte forma:

$$\text{Min. } \sum_{j \in N} \sum_{h \in N} \sum_{m \in N} \sum_{k \in N} Q_{jk} \cdot X_{jhmk} \cdot c (d_{jh} + \alpha \cdot d_{hm} + d_{mk}) \quad (1)$$

S. a:

$$\sum_{h \in N} \sum_{m \in N} X_{jhmk} = 1, \forall j, k \in N, j \neq k, \quad (2)$$

$$\sum_{h \in N} \sum_{m \in N} X_{jhmk} \leq V_{j,h}, \forall j, h, m, k \in N, \quad (3)$$

$$\sum_{h \in N} \sum_{m \in N} X_{jhmk} \leq V_{k,m}, \forall j, h, m, k \in N, \quad (4)$$

$$\sum_{h \in N} V_{j,h} = 1, \forall j \in N, \quad (5)$$

$$\sum_{j \in N, j \neq k} \sum_{m \in N} \sum_{k \in N} (X_{jhmk} + X_{jmhk}) \leq M \cdot Y_h, \forall h \in N, \quad (6)$$

$$\sum_{h \in N} Y_h = p, \quad (7)$$

$$Y_h, X_{jhmk}, V_{j,h} \in \{0,1\}, \forall j, h, m, k \in N \quad (8)$$

Onde:

M : constante positiva muito grande

A função objetivo (1) visa minimizar o custo total de transporte. Vai ser a minimização da soma dos custos de transporte entre os spokes de origem e os hubs, com os custos de transporte de hub para hub (que vai ter um fator de desconto α inerente a esse tipo de viagens), e os custos das viagens dos hubs para os spokes de destino.

A restrição (2) assegura que o todo o fluxo de passageiros que sai de um spoke seja atribuído a um hub, i.e., toda a procura vai ser servida. As restrições (3) e (4) impedem atribuições a nós onde não existam hubs, ou seja, um spoke apenas pode estar atribuído a um nó hub, seja de um spoke de origem para um hub, como de um hub para um spoke de destino. A restrição (5) é a restrição que vai garantir que a atribuição vai ser simples, ou seja, a procura de um nó j vai ser totalmente atribuída ao hub em h . A restrição (6) assegura que as viagens apenas podem passar por nós que sejam hubs, sejam 1-stop ou 2-stop. Por fim, a restrição (7) assegura que vão ser considerados p número de hubs na rede.

4.1.2 Modelo da p -hub mediana com política de centralização estrita e atribuição múltipla

O modelo de atribuição múltipla com política de centralização estrita, designado abreviadamente por modelo p -HM-AM/E, também foi formulado à semelhança do modelo anterior, com uma nova formulação feita com base no modelo apresentado por Ernst & Krishnamoorthy (1998), e nos modelos formulados por Aykin (1995).

Uma das razões da formulação de um novo modelo, baseado nos modelos apresentados e formulados pelos autores, foi a de conseguir uma única formulação que conseguisse definir os quatro modelos diferentes que foram estudados em apenas um modelo, definindo variáveis em comum (cada autor define de forma diferente as variáveis e os parâmetros) e, com poucas alterações, conseguir representar cada um dos modelos distintos. Em relação ao p -HM-AS/E, apenas é necessário eliminar a variável (5), que restringe o modelo a que a procura de um spoke tenha que ser totalmente atribuída a um hub, para que este modelo permita a atribuição a mais que um hub.

Como tal, o modelo p -HM-AM/E continua a ter como objetivo a minimização do custo total de transporte da rede, instalando p hubs, e permite que um spoke seja atribuído a mais que um hub.

4.1.3 Modelo da p -hub mediana com política de centralização não estrita e atribuição simples

No modelo de atribuição simples com política de centralização não estrita, designado abreviadamente por modelo p -HM-AS/NE, entra a possibilidade de poder haver ligações diretas entre spokes. Desta forma, as viagens na rede vão ser constituídas por três segmentos diferentes: viagens spoke-hub, viagens hub-hub e viagens entre spokes.

Para ter em conta as novas características que este modelo impõe é necessário adicionar algumas variáveis e parâmetros no modelo formulado (W_{jk} e ω_{jk}), bem como algumas restrições adicionais, características da política de centralização não estrita, também baseadas nos modelos de Aykin (1995).

O objetivo deste modelo continua a ser a minimização dos custos totais de transporte na rede, instalando p hubs, considerando que um spoke apenas pode ser atribuído a um único hub e que, sempre que a procura o justifique, são permitidas ligações entre spokes.

O modelo p -HM-AS/NE é formulado da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \text{Min. } & \sum_{j \in N} \sum_{k \in N} \omega_{jk} \cdot Q_{jk} \cdot W_{jk} \cdot c. (d_{jk}) \\ & + \sum_{j \in N} \sum_{h \in N} \sum_{m \in N} \sum_{k \in N} Q_{jk} \cdot X_{jhmk} \cdot c. (d_{jh} + \alpha \cdot d_{hm} + d_{mk}) \end{aligned} \quad (9)$$

S. a:

$$(3), (4), (5), (6), (7),$$

$$W_{jk} + \sum_{h \in N} \sum_{m \in N} X_{jhmk} = 1, \forall j, k \in N, j \neq k, \quad (10)$$

$$W_{jk} \leq \omega_{jk}, \forall j, k \in N, \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \sum_{j \neq k \in N} \sum_{\substack{l \neq k \in N \\ h \neq k \in N}} (X_{jlhk} + X_{klhj}) + \sum_{l \in N} (W_{lk} + W_{kl}) \\ \leq M \cdot (1 - Y_h), \forall k \in N, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \sum_{\substack{h \neq k \in N \\ h \neq t \in N}} (X_{kkht} + X_{thkk} + X_{mmth} + X_{tthk}) \\ + \sum_{h \in N} (X_{khht} + X_{thhk}) \leq M \cdot (2 - Y_k - Y_t), \forall k, t \in N, k \neq t, \end{aligned} \quad (13)$$

$$Y_h, X_{jhmk}, W_{jk} \in \{0,1\}, \forall j, h, m, k \in N \quad (14)$$

onde:

M : constante positiva muito grande

A função objetivo (9), visa minimizar os custos totais de transporte na rede. Desta vez vai ser a minimização da soma dos custos de transporte entre um nó j e um nó k quando a viagem é de forma direta (para $\omega_{jk} = 1$) e dos custos de transporte entre j e k quando este é feito através dos hubs h e m da mesma forma que na política estrita. No caso de $\omega_{jk} = 0$, ou seja, no caso de não ser permitida viagem entre spokes, o custo será dado à semelhança dos modelos com política de centralização estrita: soma dos custos entre os spokes e os hubs com os custos de transporte de hub para hub.

A restrição (10) assegura a satisfação da procura de modo a que, para cada par origem-destino, apenas um serviço será utilizado, ou o direto (spoke – spoke) ou o indireto (a passar pelo menos por um hub). A restrição (11) assegura que só existe serviço direto entre um nó j e um nó k se for permitida ligação direta entre esses dois nós. Por fim, as restrições (12) e (13), são as responsáveis para que, no caso de os nós j e k serem hubs, as variáveis binárias X_{jhmk} sejam nulas, pois nesse caso, a ligação já é direta por natureza.

4.1.4 Modelo da p -hub mediana com política de centralização não estrita e atribuição múltipla

À semelhança da Secção 4.1.2 desta tese, mas em relação ao modelo p -HM-AS/NE, apenas é necessário voltar a eliminar a restrição (5) para deixar que o modelo permita atribuições múltiplas.

O modelo de atribuição múltipla com política de centralização não estrita, designado abreviadamente por modelo p -HM-AM/NE, vai ter o mesmo objetivo: minimizar o custo total do transporte na rede, considerando os 3 segmentos de viagens possíveis, com a localização de p hubs, considerando que, quando a procura o justifique, podem haver ligações entre spokes e, cada spoke, vai poder ser atribuído a mais que um hub.

4.2 Exemplo de Aplicação

Para uma melhor ideia prática e para estudar os modelos que foram apresentados anteriormente, foram aplicados os modelos de localização de hubs a um problema hipotético de pequena dimensão. Posteriormente serão apresentados os resultados e as conclusões do estudo dos modelos de localização de hubs.

4.2.1 Dados

Este problema foi baseado nas instâncias usadas em Santos, M. (2008), onde foram aplicados vários exemplos de aplicação deste género a modelos de localização de hubs.

As coordenadas foram geradas de forma aleatória, numa região quadrangular de 25.000 Km² e a população foi gerada automaticamente segundo uma Lei de Zipf. Na Tabela 3 encontram-se as coordenadas utilizadas neste exemplo de aplicação.

A proporção de viagens foi criada com base em valores de referência da Europa e importa referir também que é considerado um dia médio do ano, como tal, o número de viagens de uma origem j será igual ao número de viagens que terá como destino esse mesmo nó j , *i.e.*, a matriz O/D será simétrica. Na tabela 4 está a matriz O/D aplicada neste exemplo de aplicação.

Tabela 3- Coordenadas e número de partidas em cada centro - Instância de estudo

Nó	Coordenadas [Km]		População [habitantes]	Partidas [pax.dia]
	X	Y		
1	1441	3315	4777945	7742
2	3126	3427	2182426	3536
3	9	3999	1438873	2331
4	2066	1250	1160928	1881
5	2870	4923	908747	1472
6	3015	2278	760113	1231
7	402	2128	700225	1134
8	4314	4064	559094	905
9	1678	1672	553786	897
10	44	3888	461068	747

Tabela 4 - Matriz O/D para a instância de estudo

O/D	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	1251	824	665	520	435	401	320	317	264
2	1251	0	376	304	237	198	183	146	144	120
3	824	376	0	200	156	131	120	96	95	79
4	665	304	200	0	126	105	97	77	77	64
5	520	237	156	126	0	82	76	60	60	50
6	435	198	131	105	82	0	63	50	50	42
7	401	183	120	97	76	63	0	46	46	38
8	320	146	96	77	60	50	46	0	37	30
9	317	144	95	77	60	50	46	37	0	30
10	264	120	79	64	50	42	38	30	30	0

4.2.2 Resultados

Na aplicação dos modelos considerou-se sempre que o número de hubs a serem considerados seria de três ($p=3$), o custo seria unitário (1 unidade monetária por quilómetro e passageiro) e que o fator de desconto α , das viagens entre hubs, seria de 0,2.

Nos modelos que consideram política de centralização não estrita, é necessário definir a variável binária ω_{jk} , considerando um limite a partir do qual é permitida ligação direta entre dois spokes. Esse limite mínimo de passageiros a partir do qual é permitida ligação direta será abreviado por w_{min} . Para a instância em estudo considera-se que é permitida ligação direta entre um spoke j e um spoke k ($\omega_{jk} = 1$) quando a procura é maior ou igual a 100 passageiros ($Q_{jk} \geq 100$), ou seja, é considerado $w_{min} = 100$.

Modelo p -HM - AS/E

O resultado obtido para o exemplo de aplicação utilizando o modelo p -HM-AS/E está representado na Figura 6. O resultado obtido para a instância em estudo para este problema foi um custo total de transporte de $270,693 \times 10^5$ u. m e os 3 hubs localizados nos nós 1, 2 e 4.

Como seria de esperar, sendo os aeroportos 1 e 2 os que apresentam maior número de partidas (e chegadas), e também tendo grande número de viagens entre eles, estes foram considerados aeroportos hubs, pois assim, o custo dessas viagens, sendo hub-hub, serão menores.

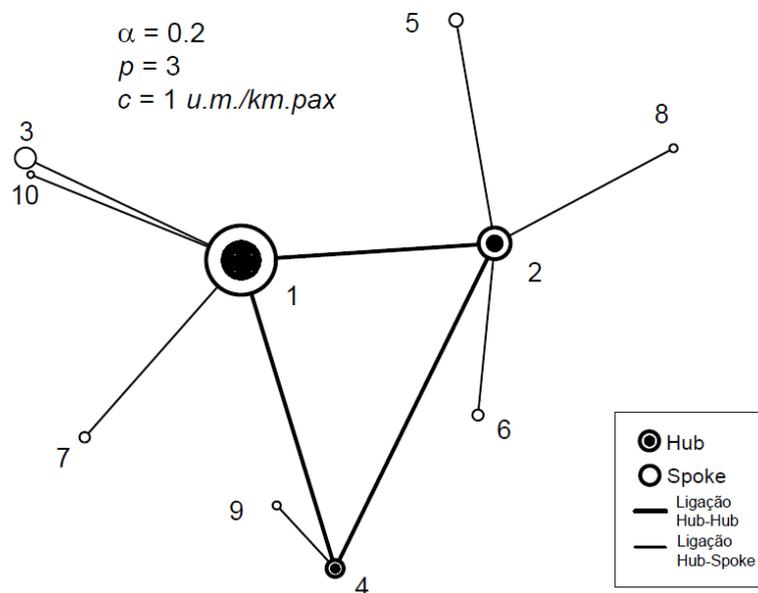


Figura 6 - Resultado da aplicação do modelo p -HM-AS/E ao exemplo de aplicação

O nó 4 também representa um dos nós maiores geradores de viagens da rede e, além disso, está relativamente afastado aos demais, o que leva a um maior custo de viagem. Assim sendo, esse nó foi escolhido de forma a minimizar essas viagens e, como se pode verificar, vai criar uma solução bastante homogénea onde as viagens mais longas são sempre servidas por uma boa parte de percurso de ligação hub-hub.

Modelo p -HM - AM/E

O resultado obtido para o exemplo de aplicação utilizando o modelo p -HM-AM/E está representado na Figura 7. O resultado obtido para a instância em estudo foi um custo total de transporte de $269,586 \times 10^5$ u.m. e a localização dos hubs nos mesmos sítios que no problema de atribuição simples: nos centros 1, 2 e 4.

Comparativamente aos resultados do problema anterior, as diferenças nas atribuições, visto que este modelo permite um spoke ser atribuído a mais que um hub, foram que o spoke 7 tem ligação com o hub no centro 1 e o hub no centro 4, e que, o spoke 6 tem ligação com os hubs 4 e 2.

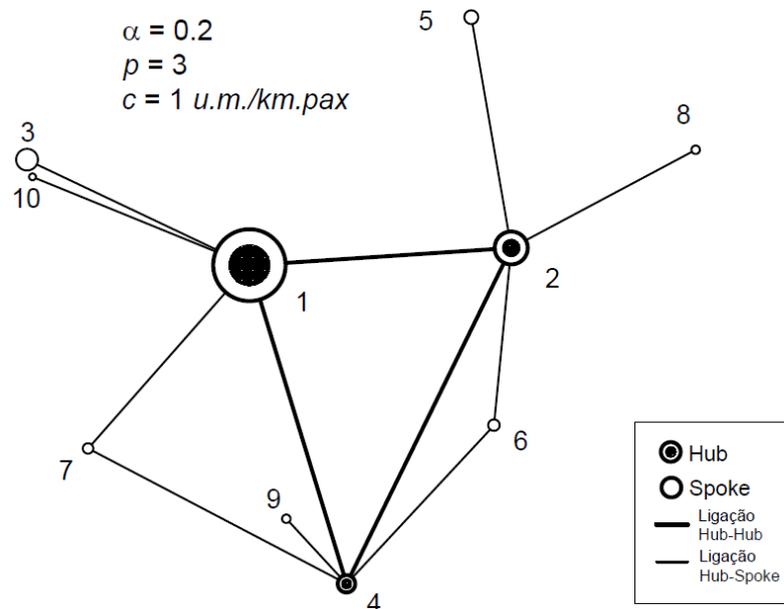


Figura 7 - Resultado da aplicação do modelo p -HM-AM/E ao exemplo de aplicação

Como seria de esperar, com o aumento da flexibilidade dos spokes poderem ser atribuídos a mais que um hub, o custo total da rede reduziu em relação ao modelo p -HM-AS/E. Neste caso concreto, a diminuição dos custos provém das viagens entre o spoke 6 e o hub 4 e os restantes aeroportos que têm esse mesmo hub como ligação, i.e., nas viagens com origem no spoke 6, se o destino for por exemplo o hub 4 ou o spoke 9, os passageiros não optarão pela rota dada pelo método de atribuição simples e sim por esta rota que seria de menor custo. O outro caso é do spoke 7, que à semelhança do spoke 6, vai ter uma nova ligação ao hub 4 que irá minimizar alguns custos.

Modelo p -HM - AS/NE

Os resultados da aplicação do exemplo utilizando o modelo p -HM-AS/NE estão representados na Figura 8. O custo total de transporte da rede fica reduzido para $266,327 \times 10^5$ u.m.. Em relação ao modelos anteriores, os hubs continuam a ser atribuídos aos mesmos nós (1, 2 e 4) e as ligações spoke-hub ocorrendo de igual modo que nos resultados para a política estrita na atribuição simples. Visto que é permitida a existência de ligações diretas entre spokes (para

$w_{min}=100$ pax), o modelo vai atribuir uma ligação direta entre o spoke 3 e o spoke 5 e uma outra ligação direta entre o spoke 3 e o spoke 7.

As viagens entre o nó 3 e 5 efetuavam-se pelo hub 1 e pelo hub 2 e, por passageiro, o custo da ligação direta será menor que a ligação 2-stop (apesar do fator de desconto). Na ligação direta entre o nó 3 e o nó 7 (que antes se fazia passando no hub 1) também o custo será menor. Juntando o fato de esses percursos serem de menor custo e de serem percursos que a procura assim o justifica (100 pax), são criadas essas duas ligações diretas que vão fazer diminuir bastante o custo total da rede.

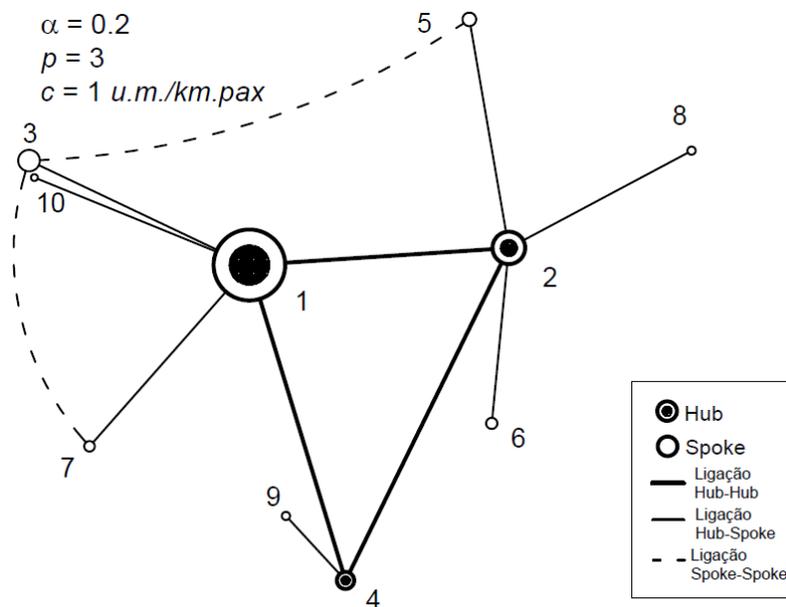


Figura 8 - Resultado da aplicação do modelo p -HM - AS/NE ao exemplo de aplicação

Modelo p -HM - AM/NE

Os resultados da aplicação do exemplo utilizando o modelo p -HM-AM/NE estão representados na Figura 9. O custo total de transporte da rede é o menor em relação aos outros problemas: $265,219 \times 10^5$ u.m. Com um resultado semelhante ao resultado da atribuição múltipla com política estrita (hubs em 1, 2 e 4 e as mesmas atribuições spoke-hub) mas com as atribuições diretas spoke-spoke resultantes da aplicação do modelo de política de centralização não estrita com atribuição simples, este modelo junta a vantagem da flexibilidade dos modelos de atribuição múltipla e dos modelos com política de centralização não estrita.

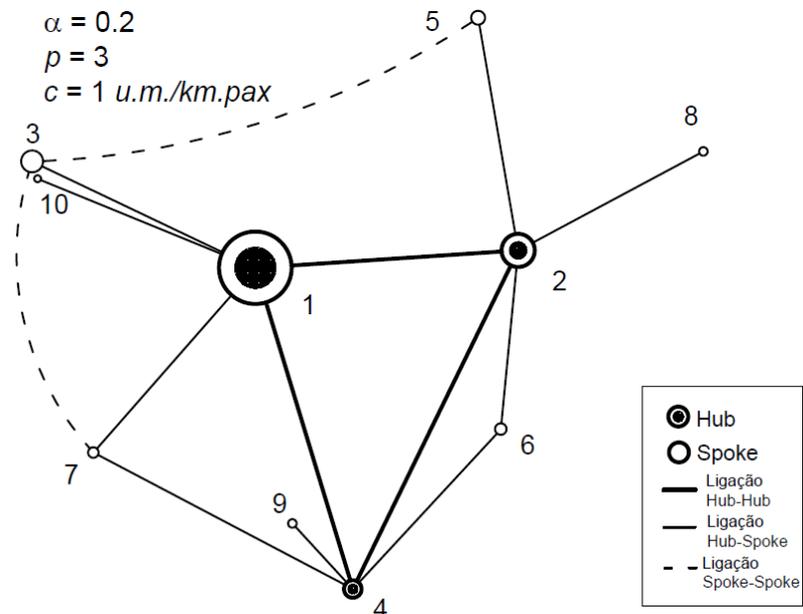


Figura 9 - Resultado da aplicação do modelo p -HM - AM/NE ao exemplo de aplicação

Analisando os resultados obtidos pelo modelo formulado para os diferentes problemas apresentados, tendo em conta a instância em estudo, podemos distinguir dois grandes pontos: a diferença entre a atribuição simples e a atribuição múltipla e a diferença entre o uso de uma política de centralização estrita e uma não estrita. Como foi estudado, para casos gerais e por norma, os resultados da atribuição múltipla são sempre menores (ou no mínimo iguais) aos dados pela atribuição simples. Isso deve-se ao referido aumento de flexibilidade da rede em que um spoke sendo atribuído a mais que um hub, permitirá que, dependendo do spoke/hub de destino, este spoke vai minimizar o custo da viagem aquando a atribuição ao primeiro hub de entre os possíveis. Em relação ao uso de uma política de centralização não estrita, esta vai aumentar a flexibilidade da rede no sentido de permitir viagens entre spokes e assim, pode haver reduções de custos quando a viagem direta compensa em relação à indireta, por valores de procura e quando é de menor custo. Para esta instância em estudo não se explorou até que valor da procura pode ser considerada a existência de ligação direta pois, mais tarde, será feita para o caso real. Este valor importa que não seja baixo pelo facto de que não é muito eficiente nem rentável para uma companhia operar ligações com pouco tráfego.

5 DADOS

Nesta secção estão apresentados os dados das redes das companhias consideradas para este estudo dos EUA, necessários para aplicar os modelos descritos anteriormente. Nos modelos de localização de hubs que vamos aplicar (descritos na Secção 4.1), temos como objetivo minimizar um custo que é representado pelo produto entre o custo unitário, a respetiva distância entre esses dois aeroportos, e a procura que existe entre eles. Importa, por isso, definir uma matriz que represente as distâncias entre os aeroportos considerados e, para cada companhia deste estudo, definir a procura que existe entre cada par Origem/Destino. Os dados que resultam desta secção são os conjuntos de nós que vão ser considerados para a rede, as distâncias que existe entre cada par origem/destino e a procura entre eles (matrizes origem/destino), para cada companhia aérea considerada.

5.1 Conjunto de Nós

No capítulo que descreve o sistema de transporte aéreo dos EUA (Secção 3.2 desta dissertação) considerou-se, para este estudo, a análise dos 40 aeroportos mais significativos em valores de tráfego geral e em comum com as referidas principais companhias aéreas a operar voos domésticos nos EUA. Estes 40 aeroportos representam entre 75 a 80% do tráfego das 6 companhias aéreas.

A aplicação dos modelos de localização de hubs a uma rede com 40 nós exige um grande esforço computacional. A resolução dos modelos para um número tão elevado de aeroportos é muito difícil computacionalmente, pelo que foram agregados os aeroportos que pertencem à mesma zona metropolitana. Desta forma, o estudo das redes aéreas será feita com base em nós que representam uma área metropolitana que são servidas por vários aeroportos. Cada um desses nós será tratado como sendo um único aeroporto com os respetivos tráfegos de origem e destino correspondendo à soma dos tráfegos adjacentes aos aeroportos que o constituem. Por exemplo, os aeroportos *Newark*, *John F. Kennedy* e *LaGuardia* constituem o nó que representa a área metropolitana de New York, sendo representado este nó como se se tratasse de um aeroporto cujas origens e os destinos são as dos aeroportos que constituem essa área metropolitana. Desta agregação dos 40 aeroportos considerados para este estudo resultam 28

nós que vão constituir a nossa rede, desta feita, considerada ser representada por 28 aeroportos com tráfegos equivalentes. Na Tabela 5 estão representados todos os 28 nós (áreas metropolitanas) considerados para este trabalho e os respetivos aeroportos que os constituem.

5.2 Distância entre Aeroportos

A matriz que representa as distâncias reais entre um dado aeroporto de origem e um aeroporto de destino foram obtidas pela lei dos cossenos aplicada a um triângulo esférico (neste caso, um triângulo inserido no planeta Terra) usando as coordenadas geográficas dos aeroportos (latitude e longitude). Com a fórmula utilizada (15), conhecida pela fórmula de Haversine, consegue-se calcular as distâncias mais curtas entre os nós considerados, tendo em conta a circunferência da Terra. No caso dos nós que representam zonas metropolitanas, as coordenadas são calculadas pelo ponto médio entre as coordenadas dos aeroportos que constituem essa zona metropolitana. A fórmula utilizada é definida da seguinte forma:

$$d_{jk} = \text{acos}(\sin \varphi_j \cdot \sin \varphi_k + \cos \varphi_j \cdot \cos \varphi_k \cdot \cos(\vartheta_k - \vartheta_j)) \times T \quad (15)$$

Onde: φ_j, ϑ_j - Latitude e Longitude de j [rad] ;
 φ_k, ϑ_k - Latitude e Longitude de k [rad] ; T = Raio da Terra: 6.371 Km

A Figura 10 representa o conjunto dos 28 nós que foram considerados na Secção 5.1 deste capítulo, distribuídos espacialmente. No Anexo A-1 está representada, como resultado deste ponto, a matriz de distâncias para os nós considerados.

5.3 Procura

Para conseguir os dados relativos à procura (i.e. as matrizes origem/destino), foram utilizados os dados pertencentes à base de dados “*DB1B Market*” da “*Airline Origin and Destination Survey*”. Esta base de dados é disponibilizada pelo Bureau of Transportation Statistics a cada trimestre e conta com dados disponíveis desde o ano de 1993 a 2013. A *DB1B* representa uma amostra de 10% do levantamento de todos os bilhetes de cada companhia aérea onde estão informações como as suas origens, destinos, detalhes dos itinerários, passageiros, etc. O *DB1B market* fornece informações de cada viagem doméstica operada por uma companhia aérea, ou seja, os dados de cada viagem de uma origem para um dado destino independentemente de como será a viagem (direta, 1-stop, 2-stop, etc.). Foram utilizados dados relativos ao primeiro trimestre de 2013, o último ano disponível. A escolha de apenas um trimestre, e não de um ano completo, deve-se ao facto de ser muito exigente computacionalmente tratar os dados de um ano completo.

Tabela 5 - Conjunto dos aeroportos agregados por área metropolitana

Área Metropolitana	Aeroporto	Código Aeroporto
Atlanta	Atlanta: Hartsfield-Jackson	ATL
Austin	Austin: Bergstrom International	AUS
Nashville	Nashville: Nashville International	BNA
Boston	Boston: Logan International	BOS
Washington	Baltimore: Washington Int.	BWI
	Washington: Ronald Reagan	DCA
Charlotte	Charlotte: Charlotte Douglas Int.	CLT
Dallas	Dallas: Dallas Love Field	DAL
	Dallas/Fort Worth: International	DFW
Denver	Denver: Denver International	DEN
Detroit	Detroit: Detroit Metro Wayne	DTW
New York	Newark: Newark Liberty Int.	EWR
	New York: John F. Kennedy Int.	JFK
	New York: LaGuardia	LGA
Miami	Fort Lauderdale: Hollywood Int.	FLL
	Miami: Miami International	MIA
	West Palm Beach International	PBI
Houston	Fort Myers: Southwest Florida	RSW
	Houston: William P Hobby	HOU
	Houston: George Bush Interc.	IAH
Las Vegas	Las Vegas: McCarran Int.	LAS
Los Angeles	Los Angeles International	LAX
	Santa Ana: John Wayne Airport	SNA
Kansas	Kansas City International	MCI
Orlando	Orlando International	MCO
Chicago	Chicago: Midway International	MDW
	Chicago: O'Hare International	ORD
Minneapolis	Minneapolis: St Paul International	MSP
New Orleans	New Orleans: Louis Armstrong Int.	MSY
San Francisco	Oakland: Metropolitan Int.	OAK
	San Francisco International	SFO
	San Jose : Norman Y. Mineta Int.	SJC
Philadelphia	Philadelphia International	PHL
Phoenix	Phoenix: Sky Harbor Int.	PHX
San Diego	San Diego International	SAN
Seattle	Seattle: Tacoma International	SEA
Salt Lake City	Salt Lake City International	SLC
Sacramento	Sacramento International	SMF
Saint Louis	St. Louis: Lambert International	STL
Tampa	Tampa International	TPA

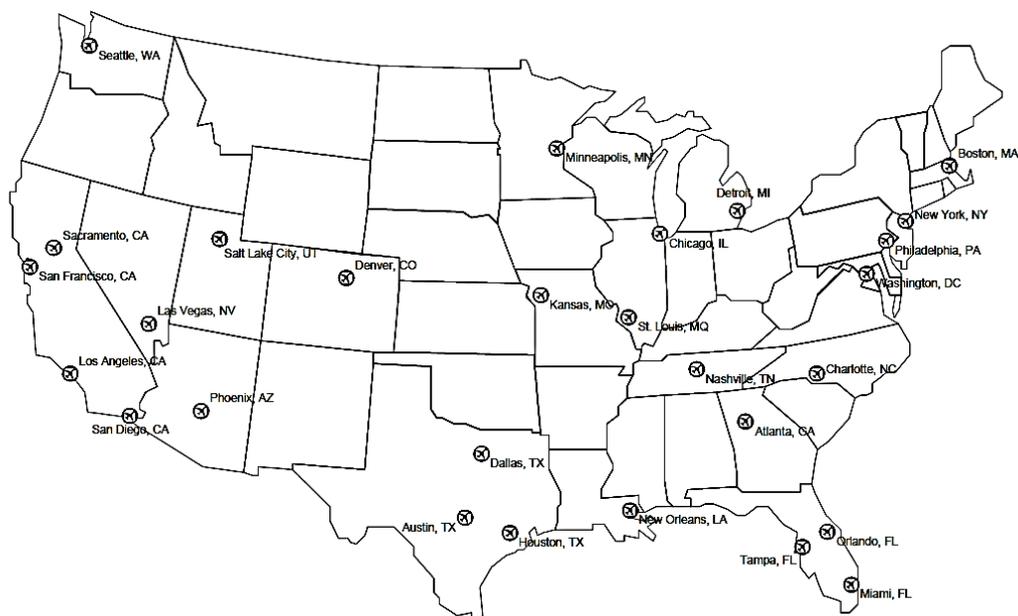


Figura 10 - Conjunto dos nós considerados para o estudo da rede aérea dos EUA

A cada entrada do *DBIB market* corresponde um bilhete comprado a uma companhia aérea, o que faz com que haja um grande número de entradas nesta tabela (5.249.522 entradas). Para tratar de forma eficiente este elevado número de entradas foi necessário programar um código para agregar os dados de todos os passageiros de cada origem j a cada destino k , para a companhia aérea pretendida e para os aeroportos que foram considerados. A procura determinada para cada companhia, resultado do tratamento da base de dados “*DBIB Market*”, é apresentada no Anexo B.

Na Figura 11 está representada, como compilação do resultado das matrizes O/D, a distribuição da procura nos nós das redes de cada uma das companhias aéreas consideradas. No mapa estão representados os valores relativos de procura em cada nó, para cada companhia. O aeroporto com menor procura foi representado por um círculo com um raio unitário, sendo que os restantes são representados com um círculo de raio proporcional com o valor da procura relativo a este. É possível verificar que, de forma geral, as viagens que têm maiores valores de tráfego coincidem com pelo menos um aeroporto que a companhia aérea utiliza como hub. Esta concentração de viagens nos hubs é um dos primeiros sinais do ‘*hubbing*’ que podemos analisar nas redes aéreas das principais companhias dos EUA.

A concentração do tráfego nos hubs não ocorre de igual forma nas companhias em estudo, o que indica que existem diferenças operacionais nas suas redes e, como tal, este efeito de ‘*hubbing*’ é mais evidente em algumas companhias que em outras. A matriz O/D da American Airlines é um exemplo de uma procura que é bastante elevada entre alguns nós que a companhia utiliza como hubs. O maior número de viagens está relacionado com os nós que são os hubs da

American, sendo que, entre os restantes pares origem-destino (entre spokes) existe uma procura bastante mais baixa. De uma forma semelhante, temos por exemplo o caso da procura da US Airways, onde vemos uma distribuição feita desse mesmo modo. A Delta Airlines também concentra igualmente os maiores valores de procura nos seus hubs mas, por sua vez, a procura de viagens entre os nós que não são hubs já é bastante mais significativa que as anteriores, o que indica uma procura forte entre os spokes. A procura da JetBlue difere de entre todas as outras pelo facto de concentrar as suas viagens quase na totalidade nos seus hubs, sendo que a procura entre spokes é residual na maior parte dos casos e centrada basicamente entre os seus hubs. A distribuição da matriz da United Airlines já mostra ser mais semelhante à da American e da US Airways, embora a procura entre os spokes nalguns casos é significativa e em outros é residual como visto na JetBlue. Por fim, a Southwest, como já visto anteriormente, é uma conhecida rede aérea *'low cost'* caracterizada por uma aposta nas ligações diretas (point-to-point), operando a um custo unitário baixo. A Southwest, apesar de considerar 9 hubs, tem a sua procura muito distribuída pelos vários pares origem-destino, diferenciando-se por não assentar tanto a sua procura nos hubs, mas sim de uma forma quase homogénea pela rede.

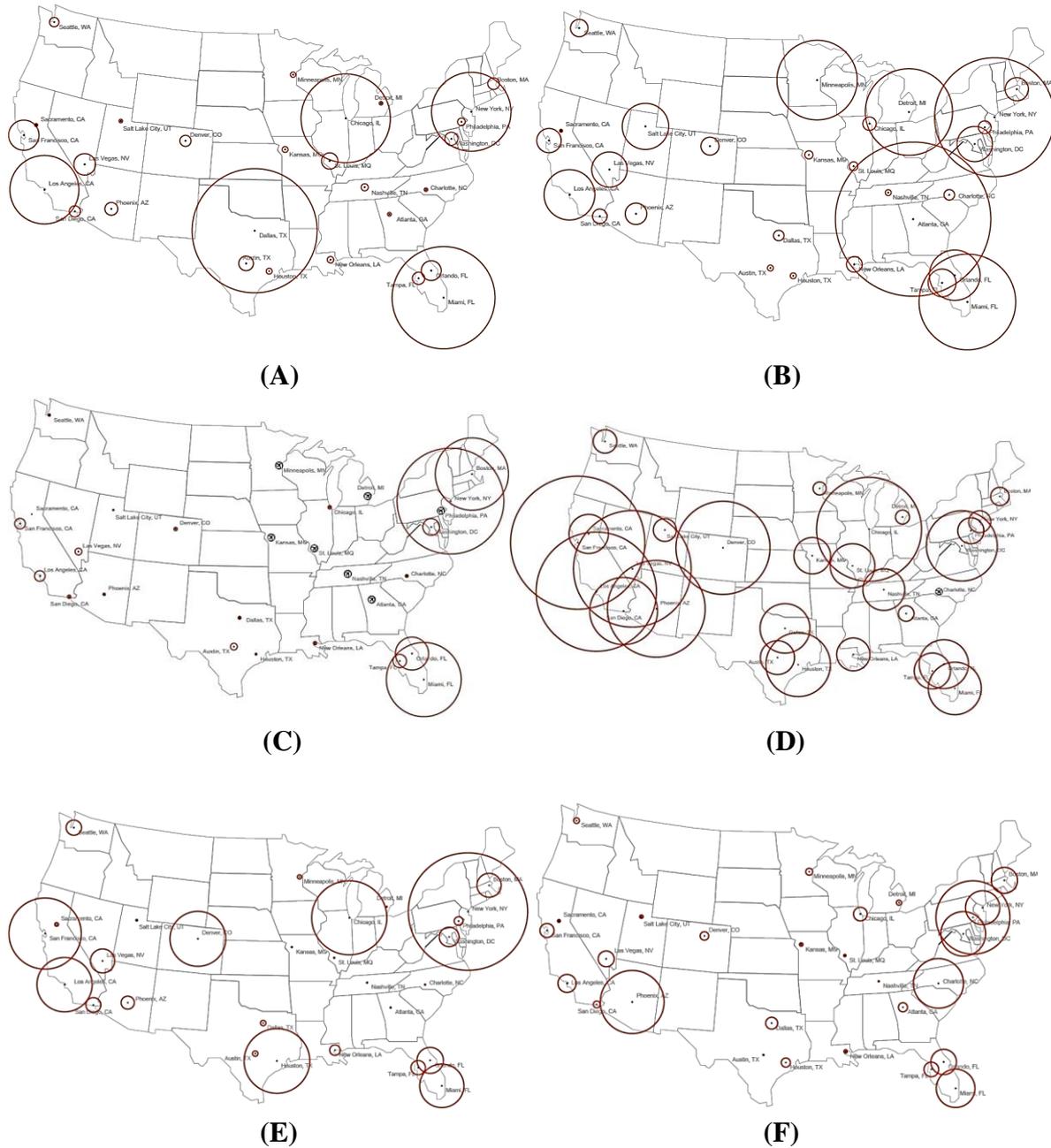


Figura 11 – Distribuição da procura em cada aeroporto por companhia; (A) – American Airl.; (B) – Delta; (C) – JetBlue; (D) – Southwest; (E) – United Airlines; (F) – US Airways

6 CALIBRAÇÃO DOS MODELOS

Como este trabalho se centra na aplicação dos modelos de localização de hubs aos dados das redes aéreas domésticas das principais companhias a operar nos EUA, importa calibrar os modelos para conseguir determinar os parâmetros que conduzem a uma maior correlação entre os fluxos observados e os fluxos modelados pelos modelos de localização de hubs. Desta forma, o objetivo desta secção consiste em escolher o modelo, e os respetivos parâmetros de calibração, cuja estrutura mais se adequa à rede de cada uma das companhias. Nesta secção é apresentado todo o processo de calibração dos modelos e os resultados obtidos.

Para conseguir a comparação entre as redes reais e as redes modeladas é importante calcular os fluxos de tráfego nos aeroportos. Os fluxos de um aeroporto j vão ser os fluxos das viagens que têm como origem esse aeroporto j (Figura 12). Para o cálculo dos fluxos foram utilizados dados de outras tabelas também pertencentes à base de dados DB1B: as tabelas “DB1B Coupon”. Cada ‘Coupon’ corresponde a um segmento de uma viagem doméstica, por exemplo, uma viagem *1-stop* é constituída por dois *coupons*, um para cada segmento da viagem (sendo que os segmentos que constituem a mesma viagem estão identificados por um mesmo código, sendo possível saber a sua conexão). Estes valores foram retirados da base de dados “DB1B Coupon”, programando a mesma para serem calculados os dados dos voos, que de entre a rede total têm origem em cada um dos aeroportos considerados. Posteriormente, estes dados vão então servir para calibrar os modelos, comparando estes fluxos observados com os fluxos resultantes das diferentes combinações dos diferentes modelos com os dados da procura obtidos, até chegar à melhor aproximação da rede que atualmente está a ser praticada pelas companhias aéreas.

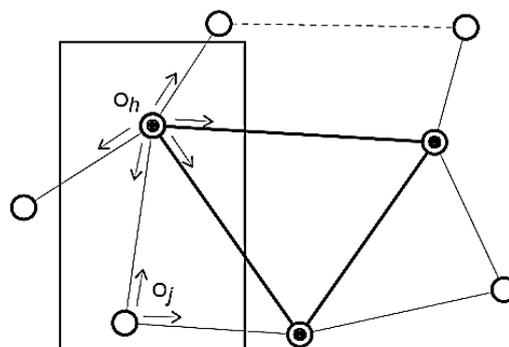


Figura 12 - Cálculo dos fluxos pelas viagens com origem em cada aeroporto

Na Tabela 6 estão os resultados dos cálculos dos fluxos de cada aeroporto, representados por O_j , através dos dados da base de dados “*DBIB Coupon*” e para cada uma das companhias consideradas neste trabalho.

Tabela 6 - Fluxos com origem em cada aeroporto para cada companhia [pax/dia]

	American A.	Delta A.	JetBlue A.	SouthWest	United A.	US Air.
Atlanta	974	61599	0	2131	153	1656
Austin	2007	766	721	4636	767	155
Nashville	940	898	0	7033	28	280
Boston	2655	2654	9201	1946	3061	3918
Washington	3169	4572	1811	16028	2605	6962
Charlotte	491	1446	276	0	230	30250
Dallas	43224	1388	267	10142	880	2210
Denver	1388	2227	318	16564	14965	1761
Detroit	508	14141	0	1602	155	869
New York	8882	12692	15185	2778	15337	5146
Miami	13921	10883	9253	8398	5784	6566
Houston	868	850	156	12259	17096	1743
Las Vegas	2663	4633	1209	21575	4025	2273
Los Angeles	10605	8254	1072	14195	10299	2814
Kansas	793	1104	0	5250	108	578
Orlando	2422	6558	5553	9832	4120	3718
Chicago	13787	1648	337	20422	16281	2395
Minneapolis	698	16024	0	1905	682	1248
New Orleans	842	1934	328	4349	1553	633
San Francisco	3740	2968	1874	17898	13864	2489
Philadelphia	906	1696	0	2852	1220	13718
Phoenix	1790	2978	230	16800	2345	19154
San Diego	1572	2611	346	8344	2591	1373
Seattle	1340	2856	492	3058	2717	990
Salt Lake City	503	10091	374	3284	503	740
Sacramento	450	511	307	5885	450	505
Saint Louis	2075	1160	0	7737	2075	499
Tampa	1558	2655	1694	6905	1558	2617
Σ	124769	181796	51003	233808	125449	117261

Aeroporto Hub da companhia

Os modelos que vão ser aplicados neste trabalho apenas têm um parâmetro que diretamente pode servir para a referida calibração – o fator de desconto α , que representa as economias de escala aplicadas nas ligações entre hubs. Porém, de uma forma indireta, existe outro parâmetro que pode ser alterado para conseguir uma melhor aproximação: o número de passageiros a partir do qual são permitidas viagens entre dois spokes, abreviado por w_{min} (o que determina os parâmetros binários ω_{jk} , que estabelece a possibilidade de ocorrerem viagens diretas entre spokes) no caso dos modelos com política de centralização não estrita.

Para a calibração dos modelos para cada companhia foram adicionadas restrições que fixassem os nós que as companhias usam como hub. Posteriormente, através de tentativas e diferentes combinações dos parâmetros atrás descritos, foram obtidas as soluções de correlação para cada modelo. Foi admitido que o parâmetro α pode assumir valores no conjunto $\{0.1, 0.2, \dots, 0.9, 1.0\}$, e o parâmetro w_{min} , pode assumir valores de $\{30, 40, 50, 60, 70, 80\}$ passageiros por dia.

A relação entre os valores observados e modelados é traduzida pelo coeficiente de determinação entre esses dois valores (R^2). Este valor é calculado como representa a seguinte equação:

$$R^2 = \left(\frac{\sum(F_j - \bar{F}_j)(G_j - \bar{G}_j)}{\sqrt{\sum(F_j - \bar{F}_j)^2 \sum(G_j - \bar{G}_j)^2}} \right)^2 \quad (16)$$

sendo F_j - fluxo real de viagens com partido no aeroporto j ;

G_j - fluxo modelado de viagens com origem no aeroporto j .

Na Tabela 7 são apresentados os melhores fatores de correlação, e o modelo correspondente, para cada companhia. Na Tabela 8 estão representados todos valores da correlação entre os fluxos observados e modelados para cada combinação de valores para os parâmetros. Na Figura 13 é mostrado graficamente a correlação entre os fluxos observados e os fluxos modelados. Por fim, são apresentados, da Figura 14 à Figura 19, as redes modeladas através da calibração que aproximam as redes que as companhias operam.

Tabela 7 – Resumo dos fatores de correlação entre os fluxos modelados e fluxos observados

Companhia	α	Modelo	w_{min} (Pax/dia)	Fator de Correlação (R^2)
American A	0.9	pHM - M/NE	70	0.897
Delta A.	0.6	pHM - M/NE	70	0.905
JetBlue	0.6	pHM - M/E	-	0.990
Southwest	0.8	pHM - M/E	-	0.944
United A.	1.0	pHM - M/E	-	0.883
US Airways	0.7	pHM - S/E	-	0.845

Tabela 8 - Fatores de Correlação entre os fluxos modelados e os fluxos observados

			α											
			W_{min}											
			Pax/dia	Modelo	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
American Airlines	-	pHM - S/E		0.792	0.803	0.803	0.836	0.855	0.855	0.865	0.865	0.865	0.869	0.890
	-	pHM - M/E		0.802	0.813	0.813	0.842	0.853	0.856	0.866	0.883	0.896	0.878	
	70	pHM - S/NE		0.792	0.803	0.803	0.836	0.855	0.855	0.865	0.865	0.865	0.869	0.890
	70	pHM - M/NE		0.802	0.813	0.813	0.853	0.852	0.856	0.867	0.884	0.897	0.879	
Delta Airlines	-	pHM - S/E		0.866	0.866	0.866	0.871	0.871	0.871	0.871	0.866	0.873	0.873	
	-	pHM - M/E		0.869	0.875	0.875	0.881	0.892	0.904	0.846	0.837	0.851	0.819	
	70	pHM - S/NE		0.866	0.871	0.871	0.875	0.887	0.897	0.847	0.837	0.832	0.794	
	70	pHM - M/NE		0.868	0.873	0.872	0.876	0.869	0.907	0.841	0.830	0.847	0.789	
JetBlue Airlines	-	pHM - S/E		0.980	0.980	0.989	0.989	0.987	0.987	0.985	0.985	0.985	0.985	
	-	pHM - M/E		0.980	0.981	0.983	0.989	0.989	0.990	0.989	0.989	0.989	0.984	
	60	pHM - S/NE		0.989	0.989	0.989	0.989	0.987	0.986	0.984	0.984	0.987	0.985	
	60	pHM - M/NE		0.989	0.989	0.988	0.987	0.987	0.989	0.987	0.987	0.987	0.976	
Southwest	-	pHM - S/E		0.940	0.940	0.940	0.940	0.940	0.940	0.940	0.940	0.940	0.940	
	-	pHM - M/E		0.940	0.942	0.940	0.937	0.936	0.937	0.934	0.944	0.935	0.941	
	60	pHM - S/NE		0.934	0.932	0.932	0.932	0.932	0.932	0.929	0.928	0.928	0.926	
	60	pHM - M/NE		0.935	0.935	0.936	0.936	0.937	0.937	0.934	0.941	0.931	0.935	
United Airlines	-	pHM - S/E		0.830	0.831	0.831	0.831	0.831	0.830	0.835	0.837	0.840	0.842	
	-	pHM - M/E		0.811	0.804	0.814	0.817	0.828	0.837	0.837	0.857	0.867	0.883	
	70	pHM - S/NE		0.831	0.831	0.831	0.831	0.831	0.829	0.835	0.835	0.839	0.842	
	70	pHM - M/NE		0.811	0.802	0.814	0.817	0.831	0.837	0.837	0.855	0.867	0.879	
US Airways	-	pHM - S/E		0.815	0.830	0.845	0.845	0.845	0.845	0.845	0.840	0.840	0.840	
	-	pHM - M/E		0.824	0.830	0.823	0.815	0.809	0.805	0.794	0.779	0.732	0.685	
	60	pHM - S/NE		0.811	0.831	0.841	0.841	0.841	0.841	0.841	0.836	0.834	0.832	
	60	pHM - M/NE		0.820	0.826	0.819	0.811	0.806	0.801	0.826	0.775	0.731	0.696	

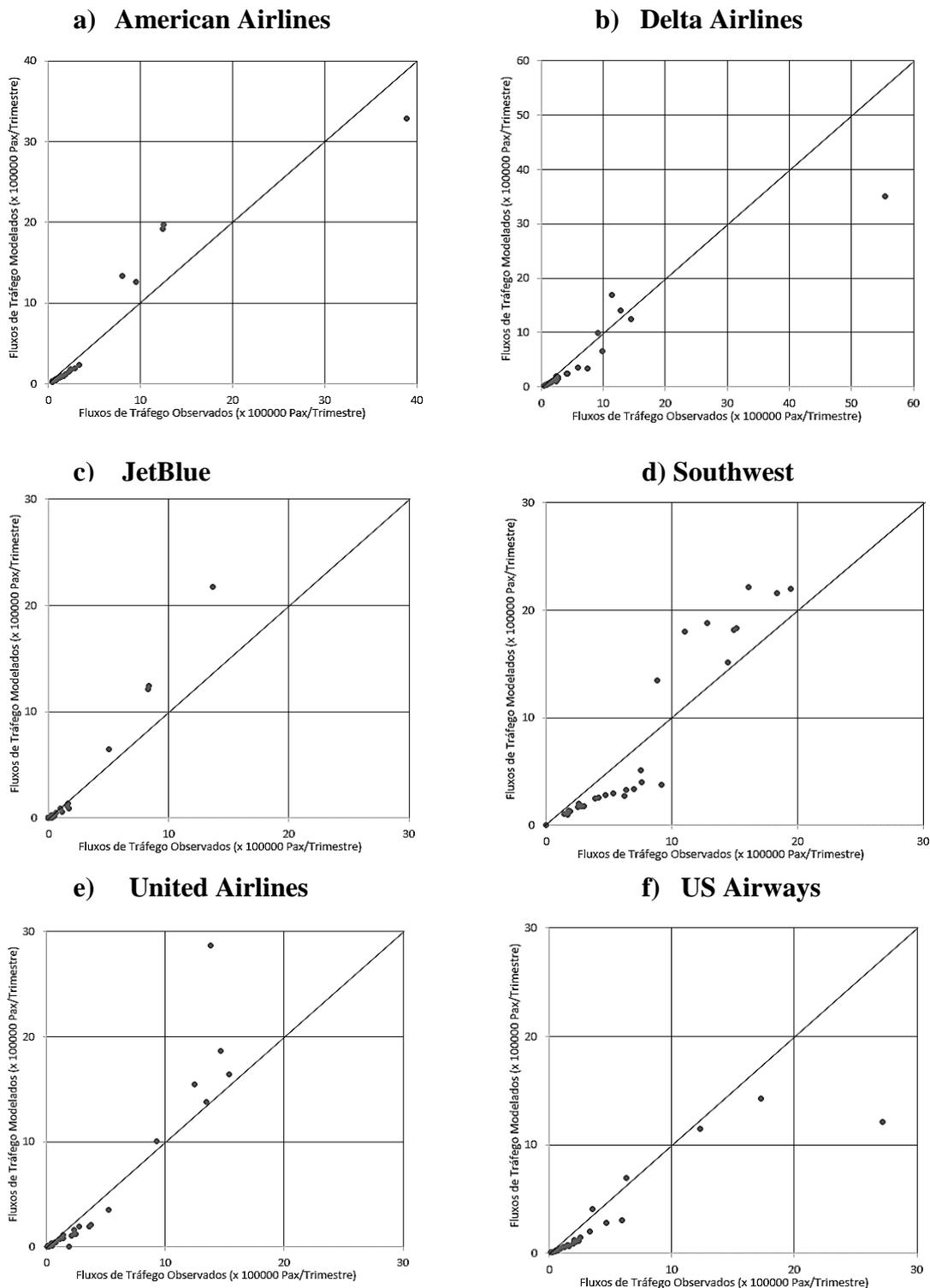


Figura 13 - Relação entre o tráfego observado e o tráfego modelado nos aeroportos para as companhias aéreas em estudo

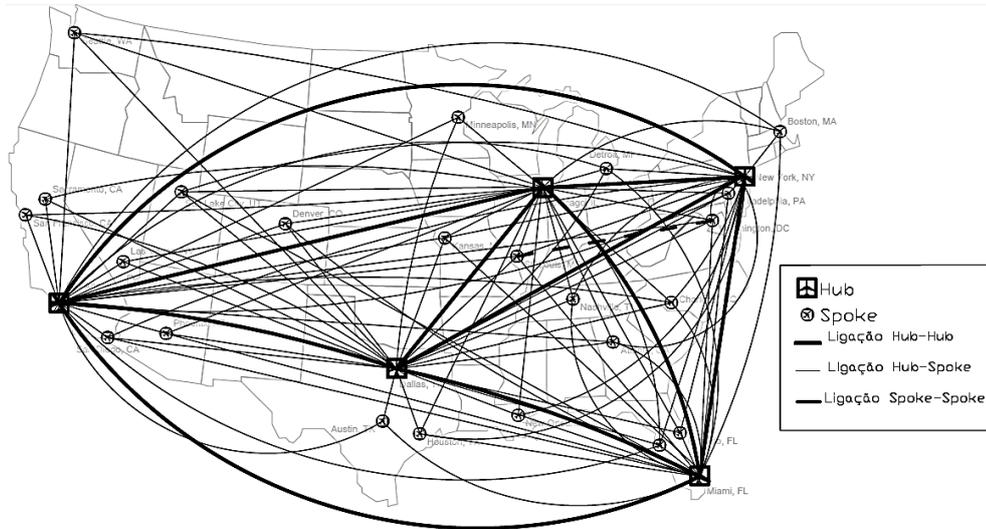


Figura 14- Rede Atual da **American Airlines**

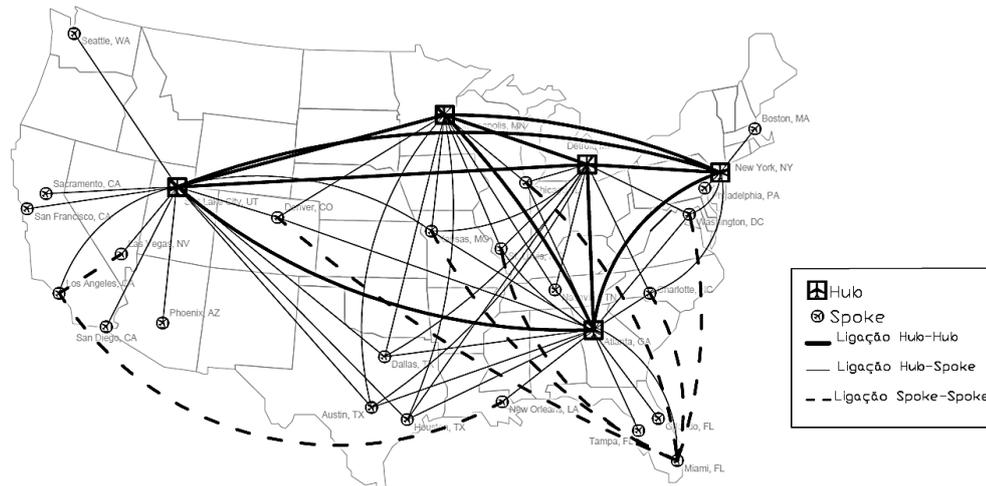


Figura 15 - Rede Atual da **Delta Airlines**

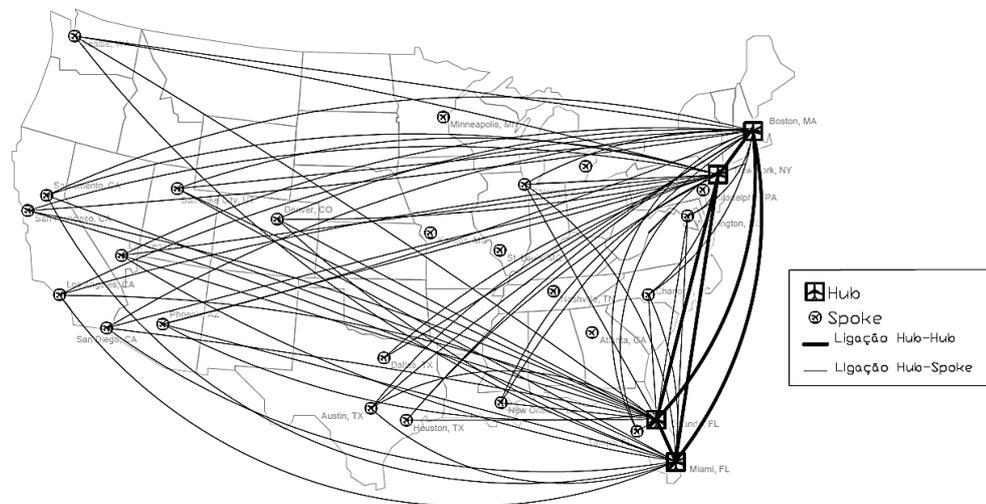


Figura 16 - Rede Atual da **JetBlue**



Figura 17 - Rede Atual da Southwest

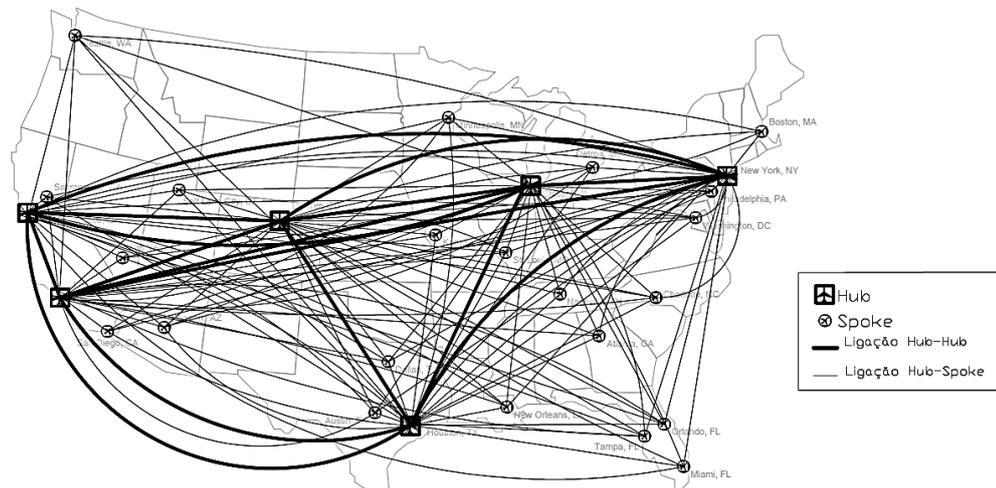


Figura 18 - Rede Atual da United Airlines

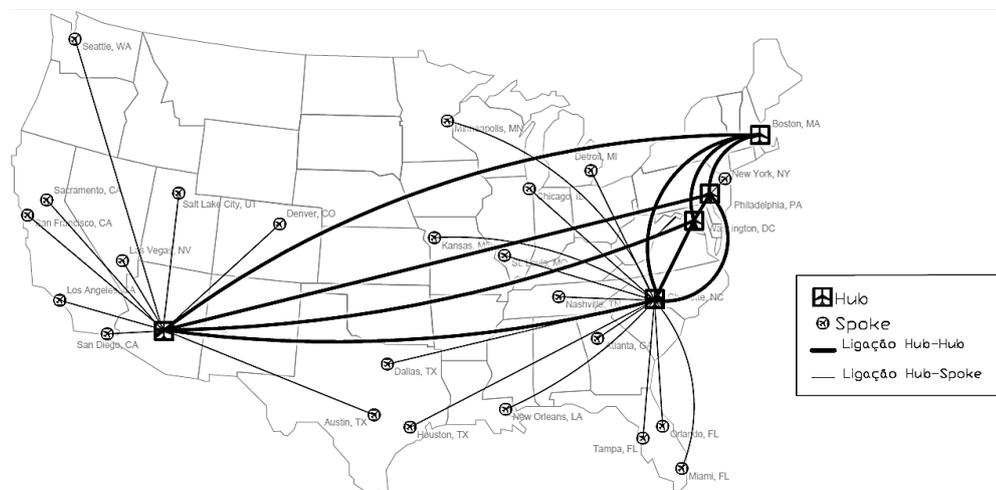


Figura 19 - Rede Atual da U.S. Airways

Após o processo de calibração efetuado pode ser retirada uma importante conclusão para este trabalho: as redes que foram modeladas e calibradas através dos modelos de localização de hubs estudados e com os dados de tráfego reais aproximam-se bastante das redes que as companhias atualmente praticam nos EUA, e como se pode ver pelos valores da Tabela 7, a relação entre as redes que foram modeladas e as redes reais apresentam fatores de correlação de entre 0,85 (U.S. Airways) conseguindo chegar até a 0,99 (JetBlue), evidenciando a grande aproximação das redes operadas pelas companhias aéreas e das redes hub-and-spoke.

Os resultados desta calibração mostram que, de uma forma geral, o modelo que mais se aproxima às redes observadas pelas companhias aéreas é o modelo de atribuição múltipla com política de centralização estrita – Modelo pHM-M/E, seguido do Modelo pHM-M/NE, com a exceção do caso da US Airways, que resultou ser um modelo de atribuição simples (modelo pHM-S/E). A aproximação ao modelo de atribuição múltipla com política de centralização estrita é explicada pelo facto de, para este trabalho, serem considerados aeroportos com níveis de tráfego bastante significativos. Muitas vezes, estes aeroportos, para compensar a sua dimensão e a sua procura, são atribuídos por ligações múltiplas aos vários hubs (e em alguns casos diretamente a outros spokes). Por outro lado, quando as economias de escala nas ligações entre hubs não são tão explícitas, os aeroportos também vão considerar mais ligações a outros hubs para minimizar o custo total.

As rede operadas pela American e pela Delta Airlines são aproximadas ambas pelo modelo de atribuição múltipla com política de centralização não estrita – Modelo pHM-M/NE, ou seja, em alguns nós spokes cujo tráfego é significativo, são considerados voos diretos entre eles. A melhor aproximação foi para valores de α de 0,9 para a American e 0,6 para a Delta. No caso da American Airlines, como o fator de desconto nas viagens entre hubs é baixo, ou seja, não fica tão barato uma viagem entre os hubs, a rede modelada vai ter várias atribuições múltiplas diretamente entre cada spoke para os diferentes hubs da companhia (Figura 14). Por sua vez, a Delta apresenta um grande desconto nas viagens entre hubs, logo, a rede não considera tantas atribuições dos spokes para os hubs, substituindo algumas destas por ligações indiretas passando pelos hubs, concentrando as viagens nas ligações entre hubs (Figura 15).

As redes da JetBlue, Southwest e United são aproximadas pelo modelo de atribuição múltipla com política de centralização estrita – Modelo pHM - M/E, com valores de α de 0,6; 0,8 e 1,0, respetivamente. A JetBlue, pelo seu grande desconto nas ligações entre hubs, concentra muito fluxo nas viagens entre hubs mas, pela localização dos hubs que considera (Figura 16) (os 4 hubs próximos e concentrados a Este), considera que os spokes que estão dispersos a Oeste dos hubs, pela sua grande distância a estes, são atribuídos de forma direta, por atribuições múltiplas, aos diferentes hubs. No caso da Southwest, onde a procura se encontra mais distribuída, a companhia utiliza 9 hubs (um terço dos nós). Com tantos hubs, o modelo vai considerar um

grande número de ligações entre hubs, e, nos restantes nós, várias ligações diretas dos spokes para vários hubs, conforme a procura assim o defina, sendo que, no geral, praticamente está a ser operada uma rede point-to-point (Figura 17). Por sua vez, a rede da United Airlines é a única que considera que as economias de escala não se fazem sentir nas ligações entre hubs, logo, não existe nenhuma vantagem em que as viagens se façam pelas ligações entre hubs. Por essa razão, a rede que se aproxima à rede operada por esta companhia é uma rede bastante ‘densa’, com muitas atribuições, diretamente de cada spoke aos hubs (Figura 18).

Os diferentes valores do fator de desconto para as várias companhias devem-se ao facto de que cada companhia opera de diferente forma a sua rede nos seus hubs. Companhias que tenham o tráfego assente nos seus hubs conseguem atingir fatores de desconto mais altos nas ligações entre estes aeroportos, levando a um custo menor.

Por fim, a US Airways é aproximada por um modelo de atribuição simples com política de centralização estrita – Modelo pHM-S/E. Este modelo, que apenas permite que cada spoke esteja atribuído a um hub, faz com que esta rede se caracterize por poucas ligações (sendo que os spokes estão praticamente atribuídos a apenas dois dos hubs) e um grande tráfego entre os hubs (Figura 19).

7 REDES ÓTIMAS

Na secção 4 desta dissertação foram apresentados modelos que minimizam o custo total de transporte numa rede através da localização de hubs e das atribuições entre os aeroportos da rede. Pelos resultados da calibração, com os dados de tráfego reais, foi visto que as companhias aéreas dos EUA têm atualmente redes que se aproximam bastante das redes obtidas pelos modelos de localização de hubs. A questão que nasce desta situação é se, os hubs que as companhias utilizam na sua rede aérea são os que permitem minimizar os seus custos.

A aproximação das redes aéreas das principais companhias aéreas com as redes aéreas modeladas foi feita considerando a procura atual e os hubs que as companhias utilizavam, de forma a conseguir representar os fluxos observados. Os modelos de localização de hubs vão minimizar os custos totais de transporte através da localização de hubs e através das atribuições entre estes e os restantes aeroportos. Como tal, quando não são impostas as localizações atuais dos hubs, os modelos vão determinar as localizações dos hubs que minimizam o custo, sabendo-se assim, se as localizações atuais dos hubs são as ótimas.

Nesta secção é apresentada uma comparação entre as localizações atuais e ótimas dos hubs de cada companhia em estudo, tendo por referência uma procura esperada de referência referente ao ano de 2024 (correspondendo assim, a um período de planeamento de 10 anos). As localizações ótimas dos hubs para cada companhia são obtidas através da resolução do modelo de localização de hubs que fornece uma melhor aproximação entre os fluxos modelados e os observados.

7.1 Resultados

Para efeitos do planeamento das redes das companhias aéreas dos EUA foi considerado o ano de 2024 como o ano horizonte de projeto. Segundo FAA (2014), o tráfego doméstico dos EUA irá crescer a uma taxa anual de 2,0% entre o ano de 2014 e 2034. A procura futura (usada para efeitos de planeamento das redes) foi então calculada considerando que o tráfego irá crescer à taxa prevista pela FAA entre o ano de 2014 e o ano horizonte de projeto.

A otimização das redes modeladas foi conseguida retirando as restrições dos modelos que asseguravam que os hubs seriam localizados nas localizações atuais (restrições essas adicionadas aquando da calibração dos modelos), mas impondo que o número de hubs a localizar seja o mesmo que o atual.

Os resultados foram obtidos através da resolução dos modelos para os quais se obteve um maior fator de correlação na calibração (ver Secção 6), ou seja, foram utilizados os modelos (e a respetiva combinação de parâmetros) que representavam as redes mais próximas das redes reais.

A Tabela 9 mostra um resumo dos resultados obtidos. São apresentados para a rede atual os custos totais para a procura a 10 anos e as respetivas localizações de hubs (localizações atuais). Em comparação, são apresentados os resultados para a rede ótima (isto é, com os hubs localizados nos nós de forma a minimizar os custos totais da rede). São representados os custos totais da nova rede e as localizações ótimas dadas pelos modelos, sendo que, a cor verde aparecem as novas localizações de hubs que diferem da rede atual (em substituição dos hubs marcados a vermelho na rede atual). Da figura 20 à figura 24 são apresentadas as novas atribuições e as novas localizações de hubs que levaram à diminuição do custo, nas situações em que tal se verificou. Posteriormente, são analisados e comentados os resultados obtidos. Com uma seta vermelha, na solução ótima de cada uma das companhias está representada a mudança de localização dos hubs.

Tabela 9 - Resultados da Otimização das Redes Modeladas para cada Companhia

American Airlines		Delta Airlines		JetBlue Airlines		SouthWest Airlines		United Airlines		U.S. Airways	
Modelo p-HM - AM/NE		Modelo p-HM - AM/NE		Modelo p-HM - AM/E		Modelo p-HM - AM/E		Modelo p-HM - AM/E		Modelo p-HM - AS/E	
Rede		Rede		Rede		Rede		Rede		Rede	
Atual	Ótima										
Hubs		Hubs		Hubs		Hubs		Hubs		Hubs	
DAL	DAL	ATL	ATL	BOS	NY	WAS	NAS	DNV	DNV	BOS	CLT
NY	NY	DTT	NY	NY	MIA	DNV	WAS	NY	NY	WAS	ORL
MIA	MIA	NY	LV	MIA	LV	HOU	DNV	HOU	HOU	CLT	PHL
LA	LV	MNN	ORL	ORL	ORL	LV	HOU	LA	LA	PHL	PHX
CHG	CHG	SLC	MNN			LA	LV	CHG	CHG	PHX	STL
						ORL	ORL	SF	SF		
						CHG	CHG				
						SF	SF				
						PHX	PHX				
Custo Total [x 10000 u.m.]		Custo Total [x 10000 u.m.]		Custo Total [x 10000 u.m.]		Custo Total [x 10000 u.m.]		Custo Total [x 10000 u.m.]		Custo Total [x 10000 u.m.]	
1367.71	1365.54	1373.55	1311.24	643.449	562.791	1634.75	1628.64	1466.09	1466.09	839.112	772.096
-0.16%		-4.54%		-12.54%		-0.37%		0.00%		-7.99%	

Após a otimização das redes das companhias aéreas e uma análise dos resultados descritos nesta secção, é possível afirmar que foram conseguidas soluções ótimas para satisfazer a procura futura das companhias aéreas, operando a um custo total menor do que se fossem operadas com os hubs atuais. Com esta análise, em que é visto que na maioria dos casos foram encontradas soluções melhores, é assim demonstrado que as companhias não estão a operar as suas redes com as localizações ótimas de hubs. Apesar disso, as localizações de hubs dadas pelos modelos diferem pouco das localizações dos hubs atuais das companhias, sendo que, no geral, apenas mudam um ou dois hubs para cada companhia. A United Airlines foi a única companhia cujos hubs ótimos e os hubs atuais coincidem, como tal, não houve uma redução dos custos para a rede modelada que mais se aproximava da rede real.

Nos pontos seguintes desta secção são apresentadas as redes ótimas de cada companhia, analisadas as soluções obtidas, e são comparadas com as redes atuais.

7.1.1 American Airlines

A American Airlines é uma companhia cuja rede é aproximada pelo modelo p -HM-AM/NE com um fator de correlação de 0,897, para $\alpha = 0,9$ e $w_{min} = 70$ pax/dia. Esta companhia aérea considera 5 hubs: Dallas, New York, Miami, Los Angeles e Chicago.

A rede modelada (Figura 20a) é uma rede com os 5 hubs bem repartidos pela rede e com localizações periféricas. Com um fator de desconto de 0,9 nas viagens entre hubs, o modelo vai considerar muitas atribuições múltiplas devido ao facto de não ser muito proveitoso em termos de custo fazer uso das ligações entre hubs, como tal, o modelo minimiza o custo atribuindo esse nó diretamente a outro hub.

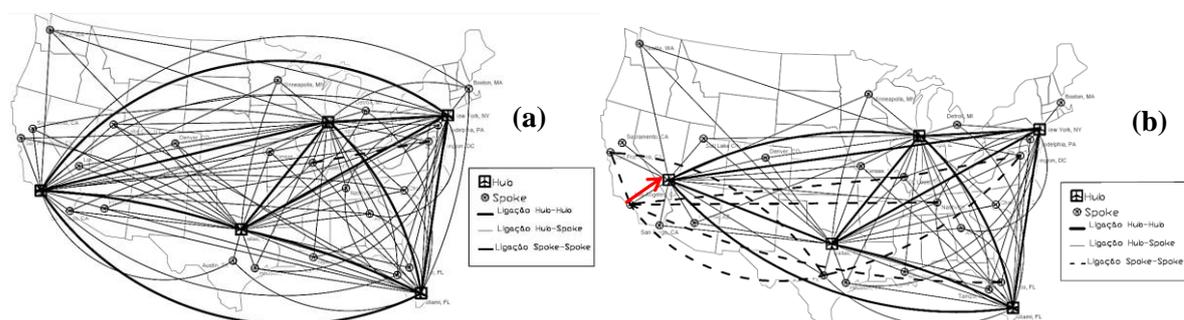


Figura 20- Rede Atual (a) e Rede Ótima (b) da American Airlines

A rede ótima permite uma redução de custo em 0,16%, que resulta da mudança da localização de um dos hubs. O modelo localizou 4 hubs que a companhia já utiliza no presente, e o quinto

hub foi localizado em Las Vegas (por vez do atual, Los Angeles). Este novo hub vai estar numa posição um pouco mais próxima dos restantes nós, e numa localização mais estratégica para os nós situados a Oeste (Figura 20b). Além disso, são consideradas novas ligações diretas entre spokes eliminando algumas das atribuições múltiplas.

7.1.2 Delta Airlines

A Delta Airlines é a outra companhia cuja rede é aproximada pelo modelo p -HM-AM/NE, com uma correlação de 0,903, para $\alpha=0,6$ e $w_{min} = 70$ pax/dia. A Delta considera 5 hubs: Atlanta, Detroit, New York, Minneapolis e Salt Lake City.

A rede modelada (Figura 21a) é uma rede com os 5 hubs repartidos sobretudo pela zona Norte da rede. Entre as ligações diretas entre spokes que considera, importa referir que conta com vários voos diretos desde Miami para alguns outros spokes. Com um fator de desconto mais baixo que o da American Airlines, é possível ver que são dadas menos atribuições dos spokes aos vários hubs, sendo assim, o tráfego mais concentrado nas ligações entre hubs.

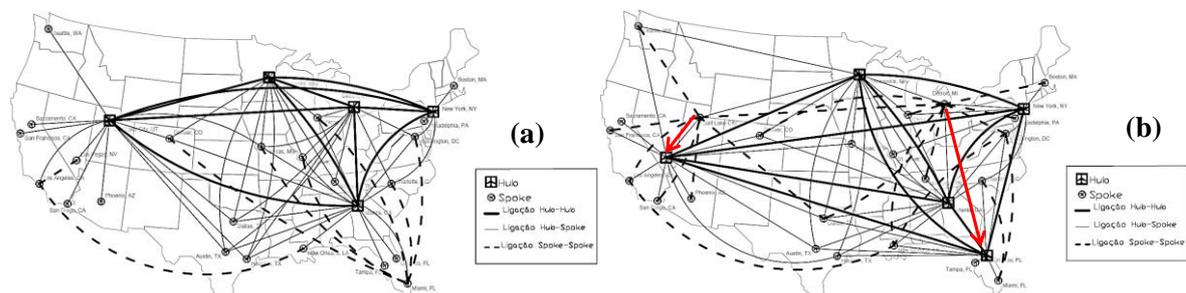


Figura 21- Rede Atual (a) e Rede Ótima (b) da Delta Airlines

Com as localizações ótimas dos hubs é conseguida uma redução de 4,54% nos custos. Esta redução deve-se ao facto de que, para este caso, houve duas localizações de hubs a serem mudadas (Figura 21b): um hub em Las Vegas e um em Orlando, por vez de Detroit e Salt Lake City. Com esta mudança, a grande procura que existia no spoke Miami (que tinha várias ligações diretas) vai ser compensada com a instalação de um hub em Orlando, que conecta diretamente com este. De forma contrária, os antigos hubs em Detroit e Salt Lake City vão ser compensados com algumas ligações diretas a spokes onde a procura é mais elevada.

7.1.3 JetBlue Airlines

A rede aérea da JetBlue é aproximada pelo modelo p -HM-AM/E, com um valor de correlação de 0,99, para $\alpha=0,6$. Os 4 hubs que a JetBlue considera na sua rede são: Boston, New York, Orlando e Miami, todos eles localizados a Este da rede (Figura 22a). A procura da JetBlue praticamente assenta nos seus hubs, sendo baixa entre os restantes nós. Com esta localização dos hubs, concentrados, os restantes spokes são atribuídos a estes hubs por ligações múltiplas, visto que, apesar do baixo custo nas ligações entre hubs, não compensa devido ao facto de estarem localizadas da forma referida.

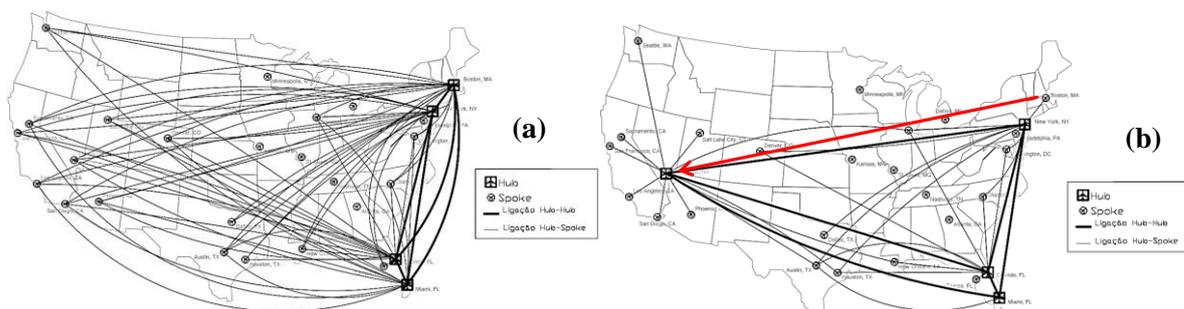


Figura 22 - Rede Atual (a) e Rede Ótima (b) da JetBlue

A rede ótima permite uma redução de custos de 12,54% com a alteração de um dos hubs. A redução dos custos provém do novo hub, que vai compensar a má distribuição dos hubs, sendo este localizado no lado oposto (Oeste), neste caso Las Vegas, por vez de Boston (Figura 22b). Esta nova localização vai levar a que sejam eliminadas grande número de ligações na rede, sendo que os nós mais a Oeste vão ser atribuídos ao novo hub, e a partir de este, e devido ao baixo fator de desconto nas ligações entre hubs, vão ser distribuídos então pelos hubs a Este. Por sua vez, a procura do antigo hub em Boston é satisfeita pelo hub que continua em New York, sendo assim, a sua procura servida por esse nó.

7.1.4 SouthWest Airlines

A rede da SouthWest é também aproximada pelo modelo p -HM-AM/E, com um fator de correlação de 0,944 e para $\alpha = 0,8$. Os 9 hubs que a companhia considera na sua rede estão bem distribuídos pela rede e são: Washington, Denver, Houston, Las Vegas, Los Angeles, Orlando, Chicago, San Francisco e Phoenix. Esta companhia, como referido, é uma companhia 'low cost', que está associada a baixos custos de operação e a redes maioritariamente point-to-point, como já foi corroborada na secção da calibração (Figura 23a) e pelo grande número de hubs.

A rede ótima consegue uma redução do custo total de 0,37% com a alteração de um dos hubs, o hub em Los Angeles passa a localizar-se em Nashville. Com esta alteração, a topologia da rede não denota grandes mudanças, continuando assim, a aproximar-se a uma rede point-to-point (Figura 23b).

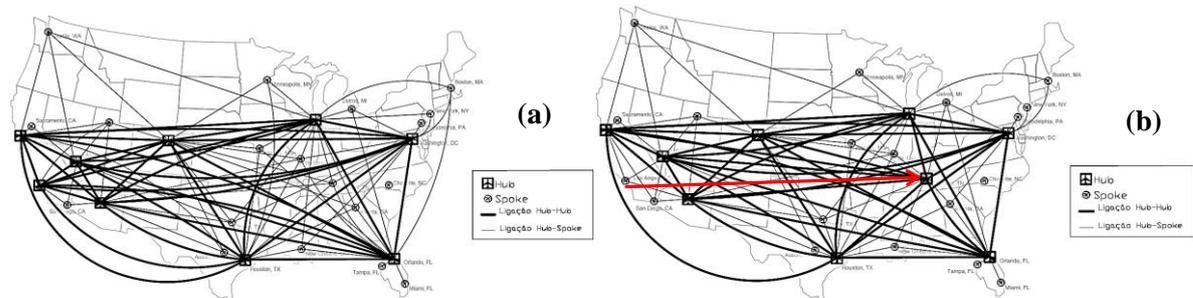


Figura 23 - Rede Atual (a) e Rede Ótima (b) da Southwest

7.1.5 United Airlines

A rede da United Airlines é também aproximada pelo modelo p -HM - AM/E, com um fator de correlação de 0,88 e com $\alpha = 1$ (Figura 18). A United considera ainda seis hubs localizados em: Denver, New York, Houston, Los Angeles, Chicago e San Francisco. Este fator de desconto nas viagens entre hubs demonstra que as economias de escala não se fazem sentir nestas ligações para esta companhia. Esta situação é explicada pelo facto de estarmos a tratar dados de aeroportos bastante grandes e significativos em valores de tráfego, o que leva a que muitas vezes estes aeroportos se compensem com viagens diretas entre eles, não tendo por isso em algumas situações, qualquer vantagem uma viagem passando pelos hubs. Como tal, nesta rede existem muitas atribuições múltiplas aos hubs, devido a não existir vantagem nas ligações entre hubs.

Após a otimização deste modelo concluiu-se que as localizações dos hubs que a empresa utiliza já são localizações ótimas e, como tal, não houve redução no custo total.

7.1.6 U.S. Airways

Por fim, a rede da US Airways aproxima-se a um modelo p -HM-AS/E, com um fator de correlação de 0,845 e para $\alpha = 0,7$. A companhia considera como hubs os aeroportos de: Boston, Philadelphia, Washington, Charlotte e Phoenix.

A rede ótima da US Airways consegue reduzir o custo total da rede em 8% com a localização de dois hubs, em Orlando e St. Louis, por troca com Boston e Washington. Os 4 primeiros nós estão situados a Este (um pouco à semelhança do que acontecia com as localizações dos hubs da JetBlue) e Phoenix, situado a Oeste. Como este modelo apenas admite que um spoke esteja atribuído a um hub, na zona Este os hubs vão estar interligados e situados proximamente uns dos outros, e a maioria do tráfego dos spokes está atribuído ao nó ‘Charlotte’, enquanto que, na zona Oeste da rede, os spokes estão atribuídos ao nó ‘Phoenix’ (Figura 24a). Com a rede ótima (Figura 24b) vamos obter uma rede com os hubs bem dispersos pela rede e os spokes já estão atribuídos a esses novos hubs numa forma mais homogénea e não centrado em apenas dois dos hubs.

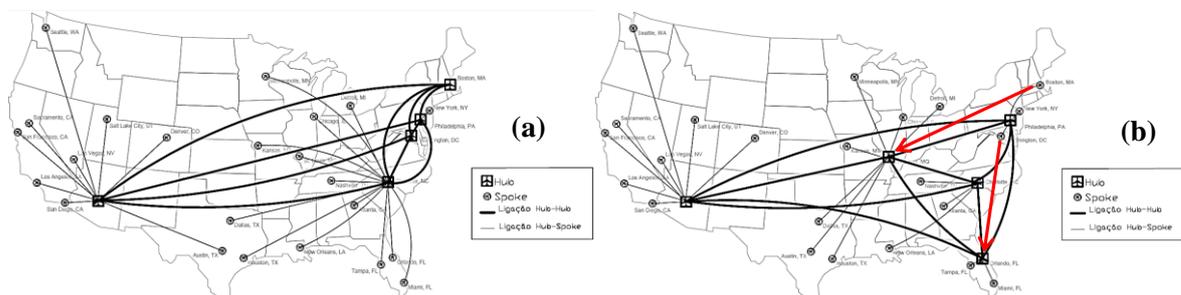


Figura 24- Rede Atual (a) e Rede Ótima (b) da US Airways

7.2 Otimização com o modelo p -HM-AM/NE

Os resultados obtidos anteriormente mostram uma otimização das redes segundo o modelo que representa a rede que mais se adapta à rede real. Como demonstrado na Secção 4 desta dissertação, o modelo que caminha para menores valores totais de custos é o modelo de atribuição múltipla com política de centralização não estrita, p -HM-AM/NE. Visto que está a ser feito um planeamento de uma rede futura, vamos considerar que esse planeamento vai ser feito considerando que as companhias em estudo podem considerar que a sua rede pode ser aproximada pelo modelo que consiga minimizar ao máximo os seus custos totais, objetivo geral de uma companhia aérea.

Segundo o processo de calibração, o modelo p -HM-AM/NE também consegue valores muito altos de correlação em relação às redes aéreas observadas apesar de não ser o modelo que mais se aproxima em alguns casos. A Tabela 8, da secção da calibração, apresenta os fatores de correlação entre as redes observadas e as redes modeladas com o modelo p -HM-AM/NE, para cada uma das companhias.

As redes vão ser modeladas com o modelo p -HM-AM/NE e, posteriormente, vão ser otimizadas considerando a procura futura (de 10 anos), conseguindo assim uma solução com custos totais menores que os conseguidos na Secção 7.1, para os modelos que aproximam melhor a rede de cada companhia. A American Airlines e a Delta Airlines não entram para este estudo pelo facto de já serem aproximadas pelo modelo p -HM-AM/NE e de já terem sido otimizadas para o mesmo.

Os resultados das novas atribuições de localização de hubs minimizando o custo total da rede para o modelo que, dos que foram estudados, geram um menor custo total da rede – o modelo p -HM-AM/NE, são apresentados na Tabela 10 e, podem ser visualizados nas Figuras 25 a 28.

Tabela 10 – Resultados da Otimização das Redes Modeladas com o modelo p -HM - AM/NE

JetBlue Airlines		SouthWest Airlines		United Airlines		U.S. Airways	
Modelo p -HM - AM/NE							
Rede		Rede		Rede		Rede	
Atual	Ótima	Atual	Ótima	Atual	Ótima	Atual	Ótima
Hubs		Hubs		Hubs		Hubs	
BOS	NY	WAS	AUS	DNV	DNV	BOS	WAS
NY	MIA	DNV	NAS	NY	HOU	WAS	CLT
MIA	LV	HOU	WAS	HOU	LA	CLT	KNS
ORL	ORL	LV	DNV	LA	CHG	PHL	ORL
		LA	LA	CHG	SF	PHX	PHX
		ORL	ORL	SF	PHL		
		CHG	CHG				
		SF	SF				
		PHX	PHX				
Custo Total [x 10000 u.m.]		Custo Total [x 10000 u.m.]		Custo Total [x 10000 u.m.]		Custo Total [x 10000 u.m.]	
634.205	561.691	1600.47	1599.28	1430.64	1428.23	775.026	732.809
-11.43%		-0.07%		-0.17%		-5.45%	



Figura 25- Rede Ótima da JetBlue para o modelo p-HM - AM/NE



Figura 26- Rede Ótima da Southwest para o modelo p-HM - AM/NE

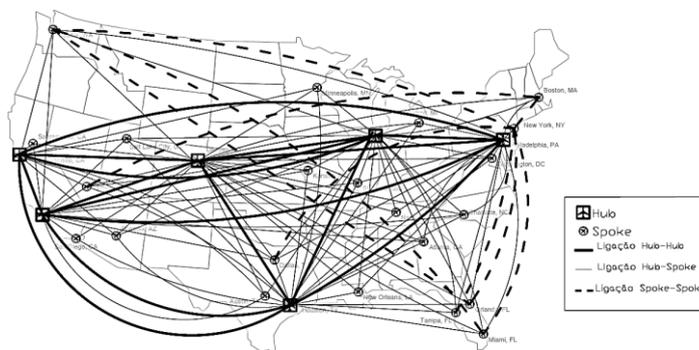


Figura 27- Rede Ótima da United Airlines para o modelo p-HM - AM/NE

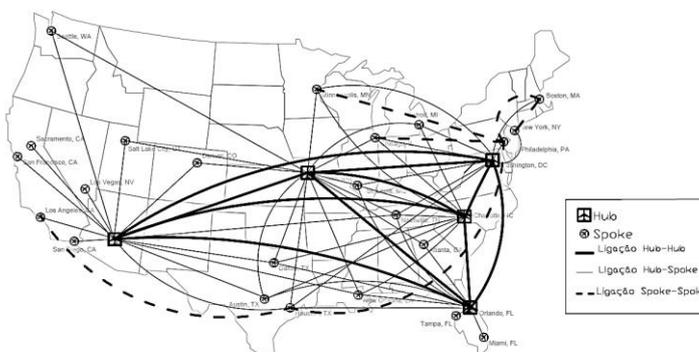


Figura 28- Rede Ótima da US Airways para o modelo p-HM - AM/NE

Como seria de esperar, e como sabemos pelo estudo feito dos modelos de localização de hubs, os resultados dos custos totais do referido modelo em comparação com os resultados dados pelos modelos que melhor aproximavam a rede foram menores em todos os casos. A adoção desta topologia de redes que permite viagens entre spokes e atribuições múltiplas aos hubs é a que satisfaz a procura futura das companhias com um menor custo possível.

Nesta otimização com modelo p -HM-AM/NE, para as companhias que não eram aproximadas por este modelo, conseguiu-se uma solução que permitiria reduzir os custos totais da rede em relação à solução obtida com a otimização da Secção 7.1. Nos pontos seguintes são apresentadas as alterações na rede que levaram a esta diminuição dos custos totais, para cada uma das quatro companhias estudadas.

A otimização considerando a aproximação da rede da JetBlue a um modelo p -HM-AM/NE, admitindo viagens entre spokes a partir dos 60 passageiros por dia e com um fator de desconto $\alpha=0,6$, consegue chegar a uma solução com o custo total mais baixo que o anterior, tendo uma redução de 0,2% em relação à solução com o modelo p -HM-AM/E. Este modelo, que caminha para menores custos totais, localizou os hubs da mesma forma que o modelo anterior e considerou praticamente as mesmas atribuições (Figura 25), sendo que, a diferença que o fez reduzir o custo em relação à solução anterior foi o facto de serem consideradas ligações diretas do antigo hub Boston para outros spokes, para os quais a procura é mais expressiva e de menor custo que as ligações passando pelos hubs.

Para a Southwest, com o modelo p -HM-AM/NE e considerando que existem viagens entre spokes a partir de 60 passageiros por dia e com os restantes parâmetros iguais, consegue-se uma solução com um custo 1,8% menor que a solução anterior (Figura 26). Para esta redução, dois dos hubs utilizados atualmente pela companhia vão ter uma nova localização: o hub em Houston e em Las Vegas são eliminados e são localizados em Austin e em Nashville. A nível de atribuições, foram adicionadas várias ligações múltiplas porque, lembrando, a matriz da procura da Southwest é muito homogénea e não é tão concentrada nos hubs, assim, essa procura entre spokes é assim satisfeita. A nível da rede, pouco mudou, sendo que a topologia desta rede continua a ser uma Point-to-point, característica desta companhia.

Para a United Airlines, com o modelo p -HM-AM/NE, para um fator de desconto de $\alpha=0,95$ e considerando viagens diretas entre spokes a partir de 70 passageiros por dia, já conseguimos obter uma solução diferente da que a companhia opera atualmente e, que consegue reduzir o custo total da rede em 2,6%, em relação à solução apresentada anteriormente. Esta redução nos custos deve-se a uma mudança na localização de um dos hubs: o hub localizado em New York passa a localizar-se em Philadelphia e, também às novas atribuições que o modelo vai considerar (Figura 27). A solução também difere nas atribuições, pelo facto de considerar

viagens entre spokes, sobretudo no antigo hub, que assim compensa alguma da sua procura, e outros nós que também têm valores mais expressivos de procura.

Por fim, para a US Airways, com o modelo p -HM-AM/NE, considerando que existem viagens entre spokes a partir de 60 passageiros por dia, consegue-se uma solução com um custo 5,1% menor que a solução anterior (Figura 28). Para esta redução, são localizados hubs em Kansas e em Orlando, por vez de Boston e Philadelphia e, obviamente, aproveitando as vantagens deste modelo, são permitidas atribuições múltiplas para os hubs e viagens diretas entre os spokes.

8 CONCLUSÃO

O transporte aéreo registou um grande desenvolvimento nas últimas décadas e é, atualmente, um dos meios de transporte mais importantes para a economia global e para a sociedade. É a forma mais rápida e segura de transporte de passageiros e mercadorias, de uma forma bastante eficiente e a preços bastante acessíveis. A história do desenvolvimento do sector aéreo conta com um acontecimento que foi preponderante para o início da evolução do transporte aéreo, nomeadamente nos EUA: A ‘Airline Deregulation Act’, uma lei aprovada em 1978, em que o governo, que regulava este setor e era responsável por definir as rotas, preços e operações, retirou o controlo que tinha sobre este sector, deixando-o em total liberdade para as companhias aéreas nas suas tomadas de decisões e expostos às forças dos mercados liberalizados para que este sector se desenvolvesse num ambiente competitivo e com qualidade.

Com esta liberalização, as companhias aéreas passaram a ser responsáveis pelas redes que operavam. Uma das mais importantes consequências da liberalização do transporte aéreo nos EUA foi a adoção de redes do tipo hub-and-spoke pelas principais companhias. Uma rede hub-and-spoke é caracterizada pela existência de um tipo de aeroportos, designados por hubs, que servem de ponto de transbordo e que concentram os fluxos entre eles e os fluxos provenientes de outros aeroportos (spokes), distribuindo-os para os vários destinos ou para um outro hub, para posteriormente dirigir-se aos destinos. As redes hub-and-spoke conduzem a grandes vantagens operacionais. Uma das vantagens é a grande diminuição do número de ligações, que passam a ser feitas de forma indireta com uma ou duas paragens nos hubs (por vez das várias ligações diretas), diminuindo assim o custo total da rede, derivado do efeito das economias de escala associado à concentração de fluxos.

O objetivo do estudo descrito nesta dissertação foi determinar a topologia futura das redes domésticas das principais companhias dos EUA. O estudo englobou a modelação das redes das companhias aéreas pelos modelos de localização de hubs, para então proceder-se à determinação das redes futuras. A determinação das redes futuras foi feita sob o objetivo de minimização dos custos de operação da rede.

Numa primeira parte deste trabalho, foram apresentados os modelos matemáticos de localização de hubs que foram objeto de estudo e que representam as redes hub-and-spoke.

Foram apresentados e formulados quatro modelos de localização de hubs de custo médio. Os modelos de custo médio têm o objetivo de minimizar os custos totais de transporte na rede através da localização de p número de hubs, sendo por isso, referidos como modelos p -hub mediana. Os quatro modelos apresentados foram os modelos p -hub mediana com atribuição simples, atribuição múltipla e, combinados com estes, com política de centralização estrita e política de centralização não estrita. O modelo de atribuição simples considera que cada spoke apenas pode ser atribuído a um único hub, enquanto que, o modelo de atribuição múltipla considera que cada spoke pode ser atribuído a mais que um hub. A esses dois modelos podem ser aplicados uma política de centralização estrita, que considera que as viagens com origem ou destino num spoke, têm que passar, no mínimo, por um hub, i.e., não são permitidas viagens de um spoke diretamente para outro spoke, ou então, uma política de centralização não estrita, que considera que, sempre que a procura o justifique, podem ser admitidas ligações diretas entre spokes.

Com os dados de tráfego do último ano (2013) relativos aos voos domésticos, foram selecionadas as companhias que são as mais representativas na rede dos EUA: a American Airlines, a Delta, a JetBlue, a Southwest, a United Airlines e a US Airways, que são responsáveis por cerca de 68% dos passageiros da rede. Posteriormente, foi analisada a rede de aeroportos e, com os valores de tráfego, foram considerados para o estudo alguns aeroportos da rede que são representativos da rede dos EUA e das companhias selecionadas. Foram considerados 40 aeroportos que representam entre 75 a 80% da rede de cada uma das companhias e, posteriormente, estes aeroportos foram agregados por zonas metropolitanas, conseguindo assim, uma rede de 28 nós. Utilizando ainda os dados de tráfego do último ano, foram calculadas as matrizes da procura (matrizes O/D) para cada uma das companhias, considerando os valores médios diários.

Os dados das redes aéreas domésticas, obtidos anteriormente, foram aplicados nos modelos de localização de hubs. Com esta aplicação, as redes obtidas (modeladas) foram calibradas de forma a conseguirem aproximarem-se o máximo possível às redes que as companhias atualmente operam. Esta calibração foi feita a partir dos fluxos nos aeroportos das redes modeladas e dos fluxos nos aeroportos observados nas companhias aéreas consideradas. A correlação entre as redes modeladas e as redes observadas foram de valores de entre 0,845 e 0,99, concluindo assim que as redes modeladas pelos modelos estudados conseguem representar muito bem as redes reais.

Por fim, foi feita a otimização das redes de cada companhia, considerando a procura esperada a 10 anos. Como tal, foi considerado que não estão instalados hubs na rede, para assim, os modelos atribuírem hubs de forma a minimizar o custo. Esta otimização foi feita considerando o modelo que mais se aproximava a cada companhia (resultante do processo de calibração).

Como resultado desta otimização, foi conseguida uma solução para American Airlines que reduzia o seu custo total em 0,2% localizando um hub em outro nó diferente de entre os que a companhia utiliza. Para a Delta Airlines foi conseguida uma redução dos custos de 4,5%, desta feita, mudando duas localizações de hubs. Na JetBlue, com a mudança da localização de um hub, conseguiu-se uma redução dos custos de 12,5%. Para a Southwest, foi corroborada a aproximação da sua topologia a uma rede point-to-point, visto que é uma conhecida companhia ‘*low cost*’, caracterizada por voos operados a um custo unitário baixo e ligações diretas. Mudando um dos seus hubs, consegue-se uma redução de 0,4% no custo total, sendo que, a sua topologia continua a aproximar-se a uma rede point-to-point. A United Airlines foi a única companhia cujas localizações ótimas dos hubs coincidem com as localizações que a companhia opera atualmente, não havendo por isso, uma solução ótima de menor custo. Por fim, a US Airways, com a mudança da localização de dois dos hubs, consegue reduzir os seus custos operacionais em 8%.

No estudo dos modelos de localização de hubs, foi mostrado que o modelo que conseguia menores custos totais era o modelo de atribuição múltipla com política de centralização não estrita, abreviado por modelo *p*-HM-AM/NE. Posteriormente, foi feita uma otimização considerando este modelo de forma a conseguir uma solução de menor custo (nas companhias cuja rede não é aproximada por este modelo). Como resultados, em relação à solução obtida na otimização, conseguem-se reduções de 0,2% na JetBlue, 1,8% na Southwest, e 5,1% na US Airways, e com este modelo, foi conseguida uma solução de menor custo na United Airlines, com uma redução de 2,6% nos custos totais da rede.

Finalizado o estudo, foi possível concluir que foram conseguidas soluções ótimas para satisfazer a procura futura das companhias aéreas, operando a um custo total menor do que se fossem operadas como estão a ser operadas atualmente. Com esta análise, em que foi visto que na maioria dos casos foram encontradas soluções melhores, é demonstrado que, visto que os modelos estudados dão localizações de hubs de modo a conseguir o mínimo custo total, as companhias não estão a operar as suas redes com as localizações ótimas de hubs. Apesar disso, as localizações de hubs dadas pelos modelos diferem pouco das localizações dos hubs atuais das companhias, sendo que, no geral apenas mudam um ou dois hubs para cada companhia.

9 BIBLIOGRAFIA

Alderighi, M., Centro, A., Nijkamp, P., Rietveld, P. (2007). “Assessment of New Hub-and-Spoke and Point-to-Point Airline Network Configurations”. *Transport Reviews*, 27:5, 529-549.

ATAG (2014), “Aviation Benefits Beyond Borders”, Report of Air Transport Action Group, April 2014. Oxford Economics

Aykin, T. (1995) “ Network Policies for Hub-and-Spoke Systems with Application to the Air Transportation System”. *Transportation Science*, Vol. 29, No.3, 201-221.

Bania, N., Bauer, P., Zlatoper, T. (1998) “ U.S. Air Passenger Service: a Taxonomy of Route Networks, Hub Locations, and Competition”. *Transportation Research*, Vol. 34, No.1, 53-74.

Bonnefoy, P., Hansman, R. (2008), “Scalability of the Air Transportation System and Development of Multi-airport Systems: A Worldwide Perspective”, Tese de Doutoramento, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA.

Bryan, D., O’Kelly, M. (1999) “ Hub-and-Spoke Networks in Air Transportation: an Analytical Review”. *Journal of Regional Science*, Vol. 39, No.2, 275-295.

Daskin, Mark (1995). “Network and Discrete Location: Models, Algorithms, and Applications”. John Wiley & Sons, Inc., New York.

Déniz, H., Sanchez, P., Dorta, A. (2013) “Classifying Airports According to their Hub Dimensions: An Application to the US Domestic Network”. *Journal of Transport Geography* 33, 188-195.

DOT (2014) “December 2013 Press Release – BTS”. Report, Bureau of Transportation Statistics, U.S.A.

Drezner, Z., Hamacher, H. (2002). “Facility Location: Applications and Theory”. Springer.

Ebery, J., Krishnamoorthy, M., Ernst, A., Boland, N. (2000) “The Capacitated Multiple Allocation Hub Location Problem: Formulations and Algorithms”. *European Journal of Operational Research* 120, 614-631.

- Ernst, A., Hamacher, H., Jiang, H., Krishnamoorthy, M., Woeginger, G. (2009) "Uncapacitated Single and Multiple Allocation p-Hub Center Problems". *Computers & Operations Research* 36, 2230-2241.
- Ernst, A., Krishnamoorthy, M. (1996) "Efficient Algorithms for the Uncapacitated Single Allocation p-Hub Median Problem". *Location Science*, Vol. 4, No. 3, 139-154.
- Ernst, A., Krishnamoorthy, M. (1998) "Exact and Heuristic Algorithms for the Uncapacitated Multiple Allocation p-Hub Median Problem". *European Journal of Operational Research* 104, 100-112.
- Ernst, A., Krishnamoorthy, M., Meyer, T. (2009) "A 2-phase Algorithm for Solving the Single Allocation p-Hub Center Problem". *Computers & Operations Research* 36, 3143-3151.
- Eurocontrol, FAA (2012) "Comparison of Air Traffic Management- Related Operational Performance: U.S./Europe". Report, Federal Aviation Association, U.S.A.
- FAA (2011) "The Economic Impact of Civil Aviation on the U.S. Economy". Report August 2011, Federal Aviation Association, U.S.A.
- FAA (2014) "FAA Aerospace Forecast: Fiscal Years 2013-2033". Report, Federal Aviation Association, U.S.A.
- Farahani, R., Hekmatfar, M., Arabani, A., Nikbakhsh, E. (2013) "Hub Location Problems: A Review of Models, Classification, Solution Techniques, and Applications". *Computers & Industrial Engineering* 64, 1096-1109.
- Ishutkina, M., Hansman, R. (2009) "Analysis of the Interaction between Air Transportation and Economy Activity: A Worldwide Perspective". Relatório da Tese de Doutoramento, Department of Aeronautics and Astronautics - MIT, Report No. ICAT-2009-2.
- Ivy, R. (1993) "Variations in Hub Service in the US Domestic Air Transportation Network". *Journal of Transport Geography*, Vol.1, No. 4, 211-218.
- Marianov, V., Serra, D., ReVelle, C. (1999) "Location of Hubs in a Competitive Environment". *European Journal of Operational Research*, Vol. 114, No. 2, 363-371
- NPIAS 2013-2017 (2012) "Report to Congress: National Plan of Integrated Airport Systems". Report, Federal Aviation Association, U.S.A.
- O'Kelly, M. (1987) "A Quadratic Integer Program for the Location of Interacting Hub Facilities". *European Journal of Operational Research* 32, 393-404.
- O'Kelly, M. (1998) "A Geographer's Analysis of Hub-and-Spoke Networks". *Journal of Transport Geography*, Vol. 6, No. 3, 171-186.

O’Kelly, M. *Et al* (1996) “Hub Network Design with Single and Multiple Allocation: A Computational Study”. *Location Science*, Vol.4, No.3, 125-138.

O’Kelly, M., Bryan, D. (1998) “Hub Location With Flow Economies of Scale”. *Transportation Research – B*, Vol. 32, No.8, 605-616.

O’Kelly, M., Miller, H. (1994) “ The Hub Network Design Problem: A Review and Synthesis”. *Journal of Transport Geography*, Vol. 2, No. 1, 31-40.

Oxford Economics (2011) “Economics Benefits from Air Transport in the US”. US Country Report, Oxford Economics, UK.

Ryerson, M., Kim, H. (2013) “Integrating airline operational practices into passenger airline hub definition”. *Journal of Transport Geography* 31, 84-93.

Santos, Miguel (2008) “Modelos de Optimização da Configuração de Redes de Aeroportos”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra, 1 vol.

Santos, Miguel (2012) “ Optimization Models for the Expansion of Airport Networks”. Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra, 1 vol.

Shaw, Shih-Lung (1993) “Hub Structures of Major US Passenger Airlines”. *Journal of Transport Geography*, Vol. 1, No.1, 47-58

Skorin-Kapov, D. (1998) “Hub Network Games”. *Networks*, Vol.31, No. 4, 293-302

ANEXOS

A. Matriz das Distâncias dos Aeroportos da Rede Aérea dos EUA

B. Matrizes Origem/Destino das Companhias Aéreas dos EUA

Tabela A - 1 – Matriz da distância entre os aeroportos/centros considerados [$\times 10^3$ Km]

	ATL	AUS	NAS	BOS	WAS	CLT	DAL	DNV	DTT	NY	MIA	HOU	LV	LA	KNS	ORL	CHG	MNN	NO	SF	PHL	PHX	SD	SEA	SLC	SAC	STL	TPA
ATL	0.0	1.3	0.3	1.5	0.9	0.4	1.2	1.9	1.0	1.2	0.9	1.1	2.8	3.1	1.1	0.7	1.0	1.5	0.7	3.4	1.1	2.5	3.0	3.5	2.6	3.4	0.8	0.7
AUS	1.3	0.0	1.2	2.7	2.1	1.7	0.3	1.2	1.8	2.4	1.7	0.2	1.8	2.0	1.0	1.6	1.6	1.7	0.7	2.4	2.3	1.4	1.9	2.8	1.7	2.4	1.2	1.5
NAS	0.3	1.2	0.0	1.5	0.9	0.5	1.0	1.6	0.7	1.2	1.2	1.1	2.5	2.9	0.8	1.0	0.6	1.1	0.8	3.1	1.1	2.3	2.8	3.2	2.3	3.1	0.4	1.0
BOS	1.5	2.7	1.5	0.0	0.6	1.2	2.5	2.8	1.0	0.3	2.0	2.6	3.8	4.2	2.0	1.8	1.4	1.8	2.2	4.3	0.5	3.7	4.2	4.0	3.4	4.2	1.7	1.9
WAS	0.9	2.1	0.9	0.6	0.0	0.6	1.9	2.4	0.7	0.3	1.5	2.0	3.4	3.7	1.5	1.2	1.0	1.5	1.6	3.9	0.2	3.2	3.7	3.7	3.0	3.8	1.2	1.3
CLT	0.4	1.7	0.5	1.2	0.6	0.0	1.5	2.2	0.8	0.9	1.0	1.5	3.1	3.4	1.3	0.8	1.0	1.5	1.0	3.7	0.7	2.8	3.3	3.7	2.8	3.6	0.9	0.8
DAL	1.2	0.3	1.0	2.5	1.9	1.5	0.0	1.0	1.6	2.2	1.7	0.4	1.7	2.0	0.7	1.6	1.3	1.4	0.7	2.3	2.1	1.4	1.9	2.7	1.6	2.3	0.9	1.5
DNV	1.9	1.2	1.6	2.8	2.4	2.2	1.0	0.0	1.8	2.6	2.7	1.4	1.0	1.4	0.9	2.5	1.5	1.1	1.7	1.5	2.5	0.9	1.4	1.6	0.6	1.4	1.3	2.4
DTT	1.0	1.8	0.7	1.0	0.7	0.8	1.6	1.8	0.0	0.8	1.8	1.7	2.8	3.2	1.0	1.5	0.4	0.8	1.5	3.3	0.7	2.7	3.1	3.1	2.4	3.2	0.7	1.6
NY	1.2	2.4	1.2	0.3	0.3	0.9	2.2	2.6	0.8	0.0	1.7	2.3	3.6	3.9	1.8	1.5	1.2	1.6	1.9	4.1	0.1	3.4	3.9	3.9	3.2	4.0	1.4	1.6
MIA	0.9	1.7	1.2	2.0	1.5	1.0	1.7	2.7	1.8	1.7	0.0	1.5	3.4	3.7	2.0	0.3	1.9	2.4	1.0	4.1	1.6	3.1	3.6	4.3	3.3	4.0	1.7	0.3
HOU	1.1	0.2	1.1	2.6	2.0	1.5	0.4	1.4	1.7	2.3	1.5	0.0	2.0	2.2	1.1	1.4	1.5	1.7	0.5	2.6	2.1	1.6	2.1	3.0	1.9	2.6	1.1	1.3
LV	2.8	1.8	2.5	3.8	3.4	3.1	1.7	1.0	2.8	3.6	3.4	2.0	0.0	0.4	1.8	3.3	2.4	2.1	2.4	0.7	3.5	0.4	0.4	1.4	0.6	0.6	2.2	3.2
LA	3.1	2.0	2.9	4.2	3.7	3.4	2.0	1.4	3.2	3.9	3.7	2.2	0.4	0.0	2.2	3.5	2.8	2.5	2.7	0.6	3.8	0.6	0.1	1.6	0.9	0.6	2.5	3.4
KNS	1.1	1.0	0.8	2.0	1.5	1.3	0.7	0.9	1.0	1.8	2.0	1.1	1.8	2.2	0.0	1.7	0.6	0.6	1.1	2.4	1.7	1.7	2.1	2.4	1.5	2.3	0.4	1.7
ORL	0.7	1.6	1.0	1.8	1.2	0.8	1.6	2.5	1.5	1.5	0.3	1.4	3.3	3.5	1.7	0.0	1.6	2.1	0.9	3.9	1.4	3.0	3.4	4.1	3.1	3.9	1.4	0.1
CHG	1.0	1.6	0.6	1.4	1.0	1.0	1.3	1.5	0.4	1.2	1.9	1.5	2.4	2.8	0.6	1.6	0.0	0.5	1.3	3.0	1.1	2.3	2.8	2.8	2.0	2.9	0.4	1.6
MNN	1.5	1.7	1.1	1.8	1.5	1.5	1.4	1.1	0.8	1.6	2.4	1.7	2.1	2.5	0.6	2.1	0.5	0.0	1.7	2.5	1.6	2.1	2.5	2.2	1.6	2.4	0.7	2.1
NO	0.7	0.7	0.8	2.2	1.6	1.0	0.7	1.7	1.5	1.9	1.0	0.5	2.4	2.7	1.1	0.9	1.3	1.7	0.0	3.1	1.8	2.1	2.6	3.4	2.3	3.0	1.0	0.8
SF	3.4	2.4	3.1	4.3	3.9	3.7	2.3	1.5	3.3	4.1	4.1	2.6	0.7	0.6	2.4	3.9	3.0	2.5	3.1	0.0	4.0	1.0	0.7	1.1	1.0	0.1	2.8	3.8
PHL	1.1	2.3	1.1	0.5	0.2	0.7	2.1	2.5	0.7	0.1	1.6	2.1	3.5	3.8	1.7	1.4	1.1	1.6	1.8	4.0	0.0	3.3	3.8	3.8	3.1	3.9	1.3	1.5
PHX	2.5	1.4	2.3	3.7	3.2	2.8	1.4	0.9	2.7	3.4	3.1	1.6	0.4	0.6	1.7	3.0	2.3	2.1	2.1	1.0	3.3	0.0	0.5	1.8	0.8	1.0	2.0	2.9
SD	3.0	1.9	2.8	4.2	3.7	3.3	1.9	1.4	3.1	3.9	3.6	2.1	0.4	0.1	2.1	3.4	2.8	2.5	2.6	0.7	3.8	0.5	0.0	1.7	1.0	0.8	2.5	3.4
SEA	3.5	2.8	3.2	4.0	3.7	3.7	2.7	1.6	3.1	3.9	4.3	3.0	1.4	1.6	2.4	4.1	2.8	2.2	3.4	1.1	3.8	1.8	1.7	0.0	1.1	1.0	2.7	4.1
SLC	2.6	1.7	2.3	3.4	3.0	2.8	1.6	0.6	2.4	3.2	3.3	1.9	0.6	0.9	1.5	3.1	2.0	1.6	2.3	1.0	3.1	0.8	1.0	1.1	0.0	0.9	1.9	3.0
SAC	3.4	2.4	3.1	4.2	3.8	3.6	2.3	1.4	3.2	4.0	4.0	2.6	0.6	0.6	2.3	3.9	2.9	2.4	3.0	0.1	3.9	1.0	0.8	1.0	0.9	0.0	2.7	3.8
STL	0.8	1.2	0.4	1.7	1.2	0.9	0.9	1.3	0.7	1.4	1.7	1.1	2.2	2.5	0.4	1.4	0.4	0.7	1.0	2.8	1.3	2.0	2.5	2.7	1.9	2.7	0.0	1.4
TPA	0.7	1.5	1.0	1.9	1.3	0.8	1.5	2.4	1.6	1.6	0.3	1.3	3.2	3.4	1.7	0.1	1.6	2.1	0.8	3.8	1.5	2.9	3.4	4.1	3.0	3.8	1.4	0.0

Tabela B-1 - Matriz O/D da **American Airlines** [Pax/Dia]

aerportos hubs da companhia

	ATL	AUS	NAS	BOS	WAS	CLT	DAL	DNV	DTT	NY	MIA	HOU	LV	LA	KNS	ORL	CHG	MNN	NO	SF	PHL	PHX	SD	SEA	SLC	SAC	STL	TPA
ATL	0	10	0	0	0	0	388	13	0	7	138	3	3	38	2	0	3	3	0	13	0	6	7	2	7	5	0	1
AUS	10	0	26	53	63	19	150	23	8	158	53	0	48	241	24	19	119	17	12	61	29	10	20	22	8	10	18	17
NAS	0	26	0	0	2	0	252	7	0	3	26	3	18	154	1	1	2	1	1	40	0	18	17	15	4	6	0	1
BOS	0	53	0	0	0	0	336	11	0	95	492	6	33	315	6	11	434	2	11	57	0	26	38	21	10	6	17	9
WAS	0	63	2	0	0	0	641	12	0	4	740	6	25	194	5	8	309	2	7	53	0	14	24	14	7	11	90	7
CLT	0	19	0	0	0	0	138	11	0	9	1	2	18	36	3	0	0	0	1	17	0	25	8	5	1	5	1	0
DAL	388	150	252	336	641	138	0	476	142	932	782	207	671	1061	220	513	789	215	188	616	254	368	251	269	172	117	245	291
DNV	13	23	7	11	12	11	476	0	1	21	155	11	0	6	1	13	136	0	8	2	5	0	0	1	0	0	4	16
DTT	0	8	0	0	0	0	142	1	0	0	97	3	2	30	0	1	4	0	2	8	0	7	4	2	2	3	0	1
NY	7	158	3	95	4	9	932	21	0	0	1864	13	102	1144	7	158	1150	8	11	537	0	41	134	85	21	13	196	68
MIA	138	53	26	492	740	1	782	155	97	1864	0	129	314	787	47	211	1503	43	143	355	166	129	64	109	34	23	182	190
HOU	3	0	3	6	6	2	207	11	3	13	129	0	4	18	6	8	7	7	0	11	2	3	9	8	3	5	7	3
LV	3	48	18	33	25	18	671	0	2	102	314	4	0	195	5	27	324	2	12	6	8	0	0	1	0	0	26	19
LA	38	241	154	315	194	36	1061	6	30	1144	787	18	195	0	29	235	753	11	33	259	32	3	0	4	7	2	230	45
KNS	2	24	1	6	5	3	220	1	0	7	47	6	5	29	0	12	51	1	12	7	3	16	13	3	1	3	0	8
ORL	0	19	1	11	8	0	513	13	1	158	211	8	27	235	12	0	311	7	7	39	2	7	24	23	4	11	21	0
CHG	3	119	2	434	309	0	789	136	4	1150	1503	7	324	753	51	311	0	69	4	392	64	352	267	152	4	2	224	214
MNN	3	17	1	2	2	0	215	0	0	8	43	7	2	11	1	7	69	0	9	5	0	7	9	1	1	1	2	7
NO	0	12	1	11	7	1	188	8	2	11	143	0	12	33	12	7	4	9	0	25	4	13	15	24	6	6	7	6
SF	13	61	40	57	53	17	616	2	8	537	355	11	6	259	7	39	392	5	25	0	11	0	0	2	0	0	32	38
PHL	0	29	0	0	0	0	254	5	0	0	166	2	8	32	3	2	64	0	4	11	0	11	21	4	3	4	2	3
PHX	6	10	18	26	14	25	368	0	7	41	129	3	0	3	16	7	352	7	13	0	11	0	0	0	0	0	12	14
SD	7	20	17	38	24	8	251	0	4	134	64	9	0	0	13	24	267	9	15	0	21	0	0	1	0	0	22	13
SEA	2	22	15	21	14	5	269	1	2	85	109	8	1	4	3	23	152	1	24	2	4	0	1	0	0	0	11	21
SLC	7	8	4	10	7	1	172	0	2	21	34	3	0	7	1	4	4	1	6	0	3	0	0	0	0	0	3	9
SAC	5	10	6	6	11	5	117	0	3	13	23	5	0	2	3	11	2	1	6	0	4	0	0	0	0	0	7	9
STL	0	18	0	17	90	1	245	4	0	196	182	7	26	230	0	21	224	2	7	32	2	12	22	11	3	7	0	15
TPA	1	17	1	9	7	0	291	16	1	68	190	3	19	45	8	0	214	7	6	38	3	14	13	21	9	9	15	0

Tabela B-2 - Matriz O/D da **Delta Airlines** [Pax/Dia]

aeroportos hubs da companhia

	ATL	AUS	NAS	BOS	WAS	CLT	DAL	DNV	DTT	NY	MIA	HOU	LV	LA	KNS	ORL	CHG	MNN	NO	SF	PHL	PHX	SD	SEA	SLC	SAC	STL	TPA
ATL	0	244	96	637	1261	159	549	476	424	1956	1581	392	623	971	254	697	701	400	375	522	526	341	199	254	296	80	299	477
AUS	244	0	9	19	30	17	0	0	5	104	40	0	1	1	0	24	4	4	1	1	17	1	1	1	0	0	3	18
NAS	96	9	0	20	30	20	6	4	100	6	81	4	10	12	7	24	5	3	10	12	11	10	12	14	7	3	2	26
BOS	637	19	20	0	0	9	9	14	189	18	129	7	72	42	25	334	6	258	48	49	0	39	41	30	158	9	12	38
WAS	1261	30	30	0	0	9	22	21	564	2	132	22	106	66	18	43	8	341	72	70	0	38	87	69	328	12	18	38
CLT	159	17	20	9	9	0	8	29	53	10	93	28	70	50	20	37	13	56	28	37	22	43	21	34	52	7	20	36
DAL	549	0	6	9	22	8	0	0	145	10	44	0	7	7	0	29	4	4	1	4	4	1	2	6	87	1	3	19
DNV	476	0	4	14	21	29	0	0	248	305	93	2	0	0	1	23	3	449	6	0	8	0	0	0	1	0	2	25
DTT	424	5	100	189	564	53	145	248	0	516	1870	8	539	532	33	864	158	190	117	274	74	334	145	130	154	10	60	608
NY	1956	104	6	18	2	10	10	305	516	0	2642	22	562	937	44	1021	6	396	375	598	0	208	133	286	694	16	5	539
MIA	1581	40	81	129	132	93	44	93	1870	2642	0	26	111	221	127	0	105	1176	55	82	62	71	69	94	187	23	107	0
HOU	392	0	4	7	22	28	0	2	8	22	26	0	2	4	0	10	6	10	0	2	6	1	1	0	2	0	4	8
LV	623	1	10	72	106	70	7	0	539	562	111	2	0	183	11	80	5	602	12	1	34	0	0	22	268	0	20	58
LA	971	1	12	42	66	50	7	0	532	937	221	4	183	0	49	307	8	566	158	3	41	2	0	7	505	1	15	147
KNS	254	0	7	25	18	20	0	1	33	44	127	0	11	49	0	54	0	66	15	3	9	10	5	4	2	1	0	30
ORL	697	24	24	334	43	37	29	23	864	1021	0	10	80	307	54	0	40	769	26	33	19	21	29	67	228	19	34	0
CHG	701	4	5	6	8	13	4	3	158	6	105	6	5	8	0	40	0	147	14	4	3	7	6	3	2	1	0	27
MNN	400	4	3	258	341	56	4	449	190	396	1176	10	602	566	66	769	147	0	54	357	112	640	250	212	153	43	96	326
NO	375	1	10	48	72	28	1	6	117	375	55	0	12	158	15	26	14	54	0	8	38	10	6	13	11	2	12	11
SF	522	1	12	49	70	37	4	0	274	598	82	2	1	3	3	33	4	357	8	0	10	8	1	4	204	0	10	32
PHL	526	17	11	0	0	22	4	8	74	0	62	6	34	41	9	19	3	112	38	10	0	10	34	10	121	9	7	25
PHX	341	1	10	39	38	43	1	0	334	208	71	1	0	2	10	21	7	640	10	8	10	0	0	22	232	2	10	20
SD	199	1	12	41	87	21	2	0	145	133	69	1	0	0	5	29	6	250	6	1	34	0	0	22	320	0	7	17
SEA	254	1	14	30	69	34	6	0	130	286	94	0	22	7	4	67	3	212	13	4	10	22	22	0	331	1	12	38
SLC	296	0	7	158	328	52	87	1	154	694	187	2	268	505	2	228	2	153	11	204	121	232	320	331	0	24	33	53
SAC	80	0	3	9	12	7	1	0	10	16	23	0	0	1	1	19	1	43	2	0	9	2	0	1	24	0	3	9
STL	299	3	2	12	18	20	3	2	60	5	107	4	20	15	0	34	0	96	12	10	7	10	7	12	33	3	0	28
TPA	477	18	26	38	38	36	19	25	608	539	0	8	58	147	30	0	27	326	11	32	25	20	17	38	53	9	28	0

Tabela B-3 - Matriz O/D da **JetBlue Airlines** [Pax/Dia]

 aeroportos hubs da companhia

	ATL	AUS	NAS	BOS	WAS	CLT	DAL	DNV	DTT	NY	MIA	HOU	LV	LA	KNS	ORL	CHG	MNN	NO	SF	PHL	PHX	SD	SEA	SLC	SAC	STL	TPA
ATL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AUS	0	0	0	92	3	0	0	0	0	179	83	0	6	0	0	94	0	0	0	136	0	0	0	0	0	0	0	0
NAS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BOS	0	92	0	0	809	129	233	210	0	464	2051	8	248	307	0	778	156	0	79	315	0	85	139	91	5	2	0	459
WAS	0	3	0	809	0	0	8	11	0	0	268	0	18	19	0	288	2	0	3	5	0	7	2	3	0	0	0	97
CLT	0	0	0	129	0	0	0	0	0	123	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
DAL	0	0	0	233	8	0	0	0	0	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DNV	0	0	0	210	11	0	0	0	0	77	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DTT	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NY	0	179	0	464	0	123	18	77	0	0	4084	143	334	446	0	1847	150	0	234	403	0	118	170	96	87	61	0	691
MIA	0	83	0	2051	268	0	0	1	0	4084	0	0	1	198	0	0	7	0	0	107	0	1	1	1	1	0	0	0
HOU	0	0	0	8	0	0	0	0	0	143	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
LV	0	6	0	248	18	1	0	0	0	334	1	0	0	0	0	2	0	0	0	8	0	0	0	1	0	1	0	0
LA	0	0	0	307	19	1	0	0	0	446	198	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
KNS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ORL	0	94	0	778	288	0	0	0	0	1847	0	0	2	2	0	0	2	0	0	2	0	1	1	1	1	0	0	0
CHG	0	0	0	156	2	0	0	0	0	150	7	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MNN	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NO	0	0	0	79	3	0	0	0	0	234	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SF	0	136	0	315	5	1	0	0	0	403	107	0	8	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0
PHL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PHX	0	0	0	85	7	0	0	0	0	118	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SD	0	0	0	139	2	0	0	0	0	170	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SEA	0	0	0	91	3	0	0	0	0	96	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SLC	0	0	0	5	0	0	0	0	0	87	1	0	0	0	0	1	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0
SAC	0	0	0	2	0	0	0	0	0	61	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
STL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TPA	0	0	0	459	97	0	0	0	0	691	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Tabela B-4 - Matriz O/D da **SouthWest Airlines** [*Pax/Dia*]

 aeroportos hubs da companhia

	ATL	AUS	NAS	BOS	WAS	CLT	DAL	DNV	DTT	NY	MIA	HOU	LV	LA	KNS	ORL	CHG	MNN	NO	SF	PHL	PHX	SD	SEA	SLC	SAC	STL	TPA	
ATL	0	72	0	7	231	0	94	180	7	13	1	154	109	87	4	38	204	2	2	83	1	86	17	6	10	9	4	1	
AUS	72	0	91	19	233	0	403	258	19	51	85	101	270	152	38	129	141	8	57	269	20	156	142	15	26	26	20	64	
NAS	0	91	0	88	293	0	87	201	81	124	294	187	211	158	157	332	342	20	200	50	94	168	73	20	21	22	63	227	
BOS	7	19	88	0	442	0	19	132	11	0	179	32	42	27	10	41	211	11	15	16	0	24	14	5	23	5	117	33	
WAS	231	233	293	442	0	0	149	254	174	15	803	245	269	148	110	645	308	30	218	77	0	228	200	33	77	15	269	503	
CLT	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DAL	94	403	87	19	149	0	0	161	17	70	60	1095	216	141	290	120	188	22	368	52	14	144	109	28	11	22	260	72	
DNV	180	258	201	132	254	0	161	0	91	239	177	398	766	584	288	256	542	198	147	600	180	895	320	136	254	198	267	198	
DTT	7	19	81	11	174	0	17	91	0	15	39	39	105	66	19	39	148	5	17	26	4	100	23	10	8	12	84	40	
NY	13	51	124	0	15	0	70	239	15	0	16	149	48	51	12	18	686	8	29	27	0	94	19	4	9	3	152	14	
MIA	1	85	294	179	803	0	60	177	39	16	0	106	129	36	169	2	869	22	167	16	614	75	17	6	22	12	312	259	
HOU	154	101	187	32	245	0	1095	398	39	149	106	0	342	338	134	207	399	21	504	200	69	188	124	18	33	29	209	130	
LV	109	270	211	42	269	0	216	766	105	48	129	342	0	1175	333	171	661	18	120	1714	124	794	751	299	259	577	295	128	
LA	87	152	158	27	148	0	141	584	66	51	36	338	1175	0	170	23	446	10	84	3806	21	1085	0	63	290	1044	81	43	
KNS	4	38	157	10	110	0	290	288	19	12	169	134	333	170	0	241	364	33	71	23	7	249	91	3	8	10	141	113	
ORL	38	129	332	41	645	0	120	256	39	18	2	207	171	23	241	0	610	96	253	42	369	86	26	8	4	8	383	0	
CHG	204	141	342	211	308	0	188	542	148	686	869	399	661	446	364	610	0	279	117	287	250	583	244	106	84	49	319	415	
MNN	2	8	20	11	30	0	22	198	5	8	22	21	18	10	33	96	279	0	6	6	1	196	7	1	0	1	93	11	
NO	2	57	200	15	218	0	368	147	17	29	167	504	120	84	71	253	117	6	0	26	7	60	10	7	1	3	99	215	
SF	83	269	50	16	77	0	52	600	26	27	16	200	1714	3806	23	42	287	6	26	0	6	1114	2101	495	266	0	12	10	
PHL	1	20	94	0	0	0	14	180	4	0	614	69	124	21	7	369	250	1	7	6	0	71	2	0	1	2	82	267	
PHX	86	156	168	24	228	0	144	895	100	94	75	188	794	1085	249	86	583	196	60	1114	71	0	574	283	338	327	228	74	
SD	17	142	73	14	200	0	109	320	23	19	17	124	751	0	91	26	244	7	10	2101	2	574	0	72	32	727	16	11	
SEA	6	15	20	5	33	0	28	136	10	4	6	18	299	63	3	8	106	1	7	495	0	283	72	0	152	182	48	5	
SLC	10	26	21	23	77	0	11	254	8	9	22	33	259	290	8	4	84	0	1	266	1	338	32	152	0	9	3	8	
SAC	9	26	22	5	15	0	22	198	12	3	12	29	577	1044	10	8	49	1	3	0	2	327	727	182	9	0	6	10	
STL	4	20	63	117	269	0	260	267	84	152	312	209	295	81	141	383	319	93	99	12	82	228	16	48	3	6	0	193	
TPA	1	64	227	33	503	0	72	198	40	14	259	130	128	43	113	0	415	11	215	10	267	74	11	5	8	10	193	0	

Tabela B-5 - Matriz O/D da **United Airlines** [*Pax/Dia*] aeroportos hubs da companhia

	ATL	AUS	NAS	BOS	WAS	CLT	DAL	DNV	DTT	NY	MIA	HOU	LV	LA	KNS	ORL	CHG	MNN	NO	SF	PHL	PHX	SD	SEA	SLC	SAC	STL	TPA
ATL	0	1	0	1	0	0	0	3	1	13	0	30	2	5	0	0	24	0	0	5	0	1	1	2	1	1	0	0
AUS	1	0	0	22	11	0	0	42	1	183	14	24	13	15	0	7	6	1	8	69	5	5	11	11	1	5	0	6
NAS	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BOS	1	22	1	0	0	0	6	183	1	351	31	217	59	156	1	22	362	8	15	546	0	18	69	33	3	10	1	17
WAS	0	11	0	0	0	0	3	201	1	1	1	427	28	132	2	0	634	6	11	188	0	20	29	36	3	16	0	1
CLT	0	0	0	0	0	0	0	8	0	4	0	2	1	5	1	0	29	1	0	5	0	1	2	3	0	1	0	0
DAL	0	0	0	6	3	0	0	114	0	208	1	17	3	6	0	2	88	1	1	23	1	1	2	7	0	2	0	1
DNV	3	42	1	183	201	8	114	0	3	748	199	480	172	547	12	231	434	61	103	590	88	188	163	149	1	71	1	119
DTT	1	1	0	1	1	0	0	3	0	1	3	25	2	8	0	2	30	3	2	6	0	3	2	3	0	1	0	1
NY	13	183	1	351	1	4	208	748	1	0	2304	861	541	1211	2	789	856	7	49	1082	0	319	260	158	17	33	1	533
MIA	0	14	0	31	1	0	1	199	3	2304	0	385	52	89	3	0	452	10	10	96	0	40	55	74	18	30	1	0
HOU	30	24	1	217	427	2	17	480	25	861	385	0	401	563	0	298	411	14	268	422	203	160	150	166	70	68	0	131
LV	2	13	0	59	28	1	3	172	2	541	52	401	0	65	3	17	290	3	24	367	11	0	0	23	0	0	2	37
LA	5	15	0	156	132	5	6	547	8	1211	89	563	65	0	4	154	711	16	136	934	38	3	0	39	2	0	2	37
KNS	0	0	0	1	2	1	0	12	0	2	3	0	3	4	0	1	13	0	0	4	1	1	2	2	0	1	0	2
ORL	0	7	0	22	0	0	2	231	2	789	0	298	17	154	1	0	426	4	6	211	0	15	36	85	4	26	0	0
CHG	24	6	1	362	634	29	88	434	30	856	452	411	290	711	13	426	0	147	43	688	166	211	156	153	6	39	0	228
MNN	0	1	0	8	6	1	1	61	3	7	10	14	3	16	0	4	147	0	3	58	3	8	7	4	1	4	0	3
NO	0	8	0	15	11	0	1	103	2	49	10	268	24	136	0	6	43	3	0	120	7	29	24	50	5	15	0	5
SF	5	69	0	546	188	5	23	590	6	1082	96	422	367	934	4	211	688	58	120	0	218	89	276	294	2	0	46	44
PHL	0	5	0	0	0	0	1	88	0	0	0	203	11	38	1	0	166	3	7	218	0	7	26	18	1	7	0	1
PHX	1	5	0	18	20	1	1	188	3	319	40	160	0	3	1	15	211	8	29	89	7	0	0	12	0	0	0	14
SD	1	11	0	69	29	2	2	163	2	260	55	150	0	0	2	36	156	7	24	276	26	0	0	19	0	0	2	23
SEA	2	11	0	33	36	3	7	149	3	158	74	166	23	39	2	85	153	4	50	294	18	12	19	0	0	0	1	31
SLC	1	1	0	3	3	0	0	1	0	17	18	70	0	2	0	4	6	1	5	2	1	0	0	0	0	0	0	8
SAC	1	5	0	10	16	1	2	71	1	33	30	68	0	0	1	26	39	4	15	0	7	0	0	0	0	0	0	15
STL	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0	2	2	0	0	0	0	0	46	0	0	2	1	0	0	0	0
TPA	0	6	0	17	1	0	1	119	1	533	0	131	37	37	2	0	228	3	5	44	1	14	23	31	8	15	0	0

Tabela B-6 - Matriz O/D da **US Airways** [*Pax/Dia*]

 aeroportos hubs da companhia

	ATL	AUS	NAS	BOS	WAS	CLT	DAL	DNV	DTT	NY	MIA	HOU	LV	LA	KNS	ORL	CHG	MNN	NO	SF	PHL	PHX	SD	SEA	SLC	SAC	STL	TPA
ATL	0	0	0	23	42	91	16	6	8	117	19	13	18	41	6	6	19	11	2	30	178	91	16	20	11	5	1	4
AUS	0	0	0	1	2	1	0	1	0	1	0	0	2	3	0	0	1	0	0	2	41	26	1	0	1	0	0	0
NAS	0	0	0	2	3	52	2	1	3	12	7	2	0	1	0	5	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
BOS	23	1	2	0	701	307	15	13	5	333	34	23	19	25	5	16	9	8	10	13	449	224	5	2	0	1	1	7
WAS	42	2	3	701	0	420	40	19	3	333	659	49	105	63	9	572	11	6	18	36	6	285	81	15	8	6	3	381
CLT	91	1	52	307	420	0	175	108	56	847	452	96	185	140	48	246	213	63	74	136	221	117	47	33	13	1	27	155
DAL	16	0	2	15	40	175	0	1	9	117	26	0	21	40	0	21	6	0	0	20	253	192	15	10	8	16	0	7
DNV	6	1	1	13	19	108	1	0	2	21	33	3	6	10	0	14	0	0	2	11	175	282	10	3	0	5	0	7
DTT	8	0	3	5	3	56	9	2	0	3	49	14	10	28	3	15	0	0	6	16	33	140	12	5	3	3	0	14
NY	117	1	12	333	333	847	117	21	3	0	214	120	98	119	23	85	14	8	46	57	3	416	35	12	19	5	4	33
MIA	19	0	7	34	659	452	26	33	49	214	0	27	49	44	32	0	70	49	9	25	1377	145	11	12	16	1	6	0
HOU	13	0	2	23	49	96	0	3	14	120	27	0	18	58	0	13	18	11	0	31	153	88	17	7	13	8	0	4
LV	18	2	0	19	105	185	21	6	10	98	49	18	0	0	14	34	26	12	1	4	454	268	1	2	1	0	9	10
LA	41	3	1	25	63	140	40	10	28	119	44	58	0	0	15	35	24	27	4	0	408	453	0	4	10	0	11	17
KNS	6	0	0	5	9	48	0	0	3	23	32	0	14	15	0	11	0	0	1	9	4	107	6	2	1	3	0	6
ORL	6	0	5	16	572	246	21	14	15	85	0	13	34	35	11	0	38	25	6	18	835	175	18	10	12	4	2	0
CHG	19	1	0	9	11	213	6	0	0	14	70	18	26	24	0	38	0	0	10	14	348	334	10	1	1	1	0	13
MNN	11	0	1	8	6	63	0	0	0	8	49	11	12	27	0	25	0	0	6	17	73	253	18	3	3	8	0	10
NO	2	0	0	10	18	74	0	2	6	46	9	0	1	4	1	6	10	6	0	2	112	2	0	0	0	0	0	0
SF	30	2	0	13	36	136	20	11	16	57	25	31	4	0	9	18	14	17	2	0	250	520	1	1	1	0	2	9
PHL	178	41	1	449	6	221	253	175	33	3	1377	153	454	408	4	835	348	73	112	250	0	323	118	63	1	0	2	489
PHX	91	26	0	224	285	117	192	282	140	416	145	88	268	453	107	175	334	253	2	520	323	0	182	298	170	162	123	111
SD	16	1	0	5	81	47	15	10	12	35	11	17	1	0	6	18	10	18	0	1	118	182	0	1	1	0	2	1
SEA	20	0	0	2	15	33	10	3	5	12	12	7	2	4	2	10	1	3	0	1	63	298	1	0	0	0	0	2
SLC	11	1	0	0	8	13	8	0	3	19	16	13	1	10	1	12	1	3	0	1	1	170	1	0	0	0	0	4
SAC	5	0	0	1	6	1	16	5	3	5	1	8	0	0	3	4	1	8	0	0	0	162	0	0	0	0	0	2
STL	1	0	0	1	3	27	0	0	0	4	6	0	9	11	0	2	0	0	0	2	2	123	2	0	0	0	0	1
TPA	4	0	1	7	381	155	7	7	14	33	0	4	10	17	6	0	13	10	0	9	489	111	1	2	4	2	1	0

