

# **ESTUDO SOBRE A EVOLUÇÃO DA REDE DE AEROPORTOS DOS ESTADOS UNIDOS**

**Miguel Gueifão Santos**

**António Pais Antunes**

Departamento de Engenharia Civil

Universidade de Coimbra

## **RESUMO**

A procura de transporte aéreo nos EUA tem crescido a uma taxa média anual de 4% nas últimas três décadas. O crescimento da procura não tem sido acompanhado por um aumento adequado da capacidade aeroportuária, o que tem conduzido ao agravamento dos problemas de congestionamento em vários aeroportos do país. Dada a importância do transporte aéreo para a mobilidade de pessoas e bens e para a actividade económica, é essencial dotar as infraestruturas aeroportuárias de capacidade suficiente para acomodar a procura futura, seja através da expansão dos aeroportos existentes, seja através da construção de novos aeroportos. Neste artigo, são apresentados os resultados de um estudo sobre a evolução da rede principal de aeroportos dos EUA. O estudo baseou-se num modelo de otimização destinado a auxiliar as autoridades de transporte aéreo nas suas reflexões estratégicas sobre o desenvolvimento de redes de aeroportos no longo prazo. O modelo aplica-se a um conjunto de áreas metropolitanas servidas por aeroportos ou sistemas multi-aeroporto, e determina as ações de expansão a aplicar aos aeroportos de forma a responder da melhor forma possível à procura futura com um dado orçamento.

## **ABSTRACT**

Demand for air transportation in the United States has been growing at an average annual rate of 4% over the last three decades. The increase in demand has not been matched by an adequate increase of airport capacity, and this has led to significant congestion problems at several airports across the country. Given the importance of air transportation for the mobility of people and goods and for the economic activity, it is important to scale the capacity of the airport infrastructures in order to cope with future demand, both through the expansion of the existing airports and the construction of new airports. In this paper, we present the results of a study carried out to address the evolution of the main airport network of the USA. The study was based on an optimization model designed to assist air transportation authorities in their strategic reflections regarding the long term development of airport networks. The model looks to a set of metropolitan areas served by airports or multi-airport systems and determines the set of expansion actions to apply for the airports in order to cope with future demand in the best possible way, while complying with a given budget.

## **1. INTRODUÇÃO**

O sector do transporte aéreo tem uma grande importância para a actividade económica e para a mobilidade de pessoas e bens nos EUA (Ishutkina e Hansman, 2009). Em 2005, o transporte aéreo foi responsável pelo movimento de 1304 mil milhões de passageiros-quilómetros e de 35 mil milhões de toneladas-quilómetros de mercadorias (ICAO, 2005). Estima-se que o sector contribua anualmente com cerca de 80 a 90 mil milhões de dólares para a economia americana (cerca de 1% do PIB) e empregue cerca de 800 mil pessoas (NASA-FAA, 2003).

O forte crescimento da economia americana nas últimas três décadas, consecutivamente à desregulação do sector do transporte aéreo em 1978, tem conduzido a um aumento quase contínuo do volume de tráfego. Entre 1976 e 2007, o número de partidas aumentou em cerca de três vezes, de 236 milhões para 705 milhões, o que corresponde a um crescimento médio anual de 4% (ICAO, 2005). O crescimento da procura não tem sido acompanhado por um aumento adequado da capacidade aeroportuária, o que tem conduzido ao agravamento das situações de congestionamento em vários aeroportos do país. Prevê-se que o total de custos diretos associados aos atrasos em 2007 tenha sido de cerca de 28.9 mil milhões de dólares (incluindo custos para as companhias aéreas e passageiros). Os atrasos foram ainda responsáveis por uma redução do PIB em cerca de 4 mil milhões de dólares (NEXTOR, 2010).

Estima-se que a procura de transporte aéreo nos EUA continue a crescer significativamente nos próximos anos. De acordo com FAA (2010), mesmo com hipóteses conservadoras sobre o crescimento económico, o número de partidas irá aumentar em cerca de 2.8% ao ano entre 2011 e 2031. Para o aumento previsto da procura e assumindo que o padrão de viagens se manterá, os problemas de congestionamento agravar-se-ão em vários aeroportos do país. Segundo FAA (2007), 18 aeroportos e 7 áreas metropolitanas irão necessitar de capacidade adicional em 2015, e em 2025, os problemas em causa irão estender-se a 27 aeroportos e 15 áreas metropolitanas.

De forma a assegurar um crescimento sustentável do transporte aéreo, é importante dotar as infraestruturas aeroportuárias de capacidade suficiente para acomodar a procura futura, seja através da expansão dos aeroportos existentes, seja através da construção de novos aeroportos. Os processos de decisão relativos à expansão e construção de aeroportos são complexos, envolvendo vários agentes (nomeadamente, administrações aeroportuárias, governos locais e organizações não-governamentais), todos eles capazes de influenciar decisões, mas cabe à autoridade de transporte aéreo a coordenação dos interesses em jogo e a tomada das decisões finais (Mozdzanowska, 2008). Neste artigo, são apresentados os resultados de um estudo sobre a evolução da rede principal de aeroportos dos EUA. O estudo baseou-se num modelo de otimização proposto por Santos e Antunes (2010) destinado a auxiliar as autoridades de transporte aéreo nas suas reflexões estratégicas relativas ao desenvolvimento de redes de aeroportos no longo prazo. O modelo aplica-se a um conjunto de áreas metropolitanas servidas por aeroportos ou sistemas multi-aeroporto, e determina as ações de expansão a aplicar nessas áreas de forma a responder da melhor forma possível à procura futura com um dado orçamento.

O artigo encontra-se organizado da seguinte forma. Na Secção 2 é descrita a rede de aeroportos que serviu de base ao estudo aqui exposto. Na Secção 3 é apresentado o modelo de otimização desenvolvido. Na Secção 4 é explicada a metodologia utilizada para calibrar estatisticamente os parâmetros do modelo. Na Secção 5 são apresentados os resultados obtidos através do modelo. Finalmente, na Secção 6 são enunciadas as principais conclusões extraídas do estudo e são referidas direções de trabalho para o futuro.

## **2. REDE DE AEROPORTOS**

O sistema de transporte aéreo dos EUA é servido por 5280 aeroportos públicos, dos quais 3380 são reconhecidos no National Plan of Integrated Airport Systems (NPIAS) da FAA como sendo infraestruturas de utilidade nacional. A distribuição de tráfego por estes aeroportos está longe de ser uniforme: 70% do tráfego total nacional está concentrado em apenas 31 aeroportos, e 90% em 70 aeroportos (FAA, 2011a).

O estudo descrito neste artigo teve por base uma rede constituída pelas 28 áreas metropolitanas que contêm os 33 aeroportos com maior utilização, servindo mais de 250 mil voos por ano. Estes aeroportos concentram uma grande parte do tráfego total dos EUA. Em 2008, a percentagem de voos atrasados nestes aeroportos variou 15.8% no aeroporto de St. Louis/Lambert até 32.7% no aeroporto de Newark (FAA, 2011b). Uma parte destes atrasos deve-se à generalização da estrutura *hub-and-spoke* das redes das companhias aéreas, pois ela conduz à propagação dos atrasos resultantes do congestionamento destes aeroportos por toda a rede de aeroportos.

Os aeroportos secundários localizados nas 28 áreas metropolitanas também foram incluídos no estudo, pois, desta forma, consegue-se captar a dinâmica da procura regional em torno dos sistemas multi-aeroporto. Considerou-se que para um aeroporto ser considerado parte de um sistema multi-aeroporto deveria estar localizado até a uma hora de distância por terra (aproximadamente 60 milhas) de um aeroporto principal, e servir mais de 500 mil passageiros por ano. Os aeroportos e áreas metropolitanas considerados no estudo são dados na Tabela 1.

**Tabela 1:** Conjunto de aeroportos e áreas metropolitanas considerados no estudo

Área Metro.	IATA	Nome	Tipo	Área Metro.	IATA	Nome	Tipo
Atlanta	ATL	Atlanta/ Hartsfield-Jack. Intl.	Primary	Los Angeles	LAX	Los Angeles/ International	Primary
Boston	BOS	Boston/ Logan	Primary	Los Angeles	SNA	Los Angeles/ Santa Ana	Secondary
Boston	PVD	Boston/ Providence	Secondary	Los Angeles	ONT	Los Angeles/ Ontario	Secondary
Boston	MHT	Boston/ Manchester	Secondary	Los Angeles	BUR	Los Angeles/ Burbank	Secondary
Washington	BWI	Washington/ Baltimore	Primary	Los Angeles	LGB	Los Angeles/ Long Beach	Secondary
Washington	DCA	Washington/ Reagan	Primary	Orlando	MCO	Orlando/ International	Primary
Washington	IAD	Washington/ Dulles	Primary	Orlando	SFB	Orlando/ Sanford	Secondary
Cleveland	CLE	Cleveland/ Hopkins	Primary	Chicago	MDW	Chicago/ Midway	Secondary
Cleveland	CAK	Cleveland/ Akron-Canton	Secondary	Chicago	ORD	Chicago/ O'Hare	Primary
Charlotte	CLT	Charlotte/ Douglas	Primary	Memphis	MEM	Memphis/ International	Primary
Cincinnati	CVG	Cincinnati/ Northern K. Intl.	Primary	Minneapolis	MSP	Minneapolis/ St. Paul Intl.	Primary
Denver	DEN	Denver/ International	Primary	Portland	PDX	Portland/ International	Primary
Dallas	DFW	Dallas/ Fort Worth	Primary	Philadelphia	PHL	Philadelphia/ International	Primary
Dallas	DAL	Dallas/ Love Field	Secondary	Philadelphia	ACY	Philadelphia/ Atlantic City	Secondary
Detroit	DTW	Detroit/ Metropolitan	Primary	Phoenix	PHX	Phoenix/ Sky Harbor Intl.	Primary
Detroit	FNT	Detroit/ Bishop	Secondary	Pittsburgh	PIT	Pittsburgh/ International	Primary
New York	EWR	New York/ Newark	Primary	San Diego	SAN	San Diego/International	Primary
New York	JFK	New York/ Kennedy	Primary	Seattle	SEA	Seattle/ Sea-Tac	Primary
New York	LGA	New York/ LaGuardia	Primary	San Francisco	SFO	San Francisco/ International	Primary
New York	ISP	New York/ Islip	Secondary	San Francisco	OAK	San Francisco/ Oakland	Primary
Miami	FLL	Miami/ Fort Lauderdale	Primary	San Francisco	SJC	San Francisco/ San Jose	Secondary
Miami	MIA	Miami/ International	Primary	Salt Lake	SLC	Salt Lake/ International	Primary
Houston	IAH	Houston/ Intercontinental	Primary	Saint Louis	STL	Saint Louis/ Lambert Intl.	Primary
Houston	HOU	Houston/ Hobby	Secondary	Tampa	TPA	Tampa/ International	Primary
Las Vegas	LAS	Las Vegas/ McCarran Intl.	Primary	Tampa	SRQ	Tampa/ Sarasota	Secondary
				Tampa	PIE	Tampa/ St. Petersburg	Secondary

Os sistemas multi-aeroporto foram modelados como aeroportos individuais com capacidade equivalente à dos sistemas multi-aeroporto. Isto é consistente com a ideia de que, a longo prazo, as companhias aéreas responderão aos problemas de congestionamento dos aeroportos principais transferindo as operações para os aeroportos secundários nas vizinhanças das áreas metropolitanas.

### 3. MODELO DE OTIMIZAÇÃO

O estudo sobre a evolução da rede de aeroportos dos EUA é baseado no modelo de otimização proposto por Santos e Antunes (2010). O modelo aplica-se a um conjunto de centros populacionais (áreas metropolitanas) servidas por aeroportos ou sistemas multi-aeroporto de que as capacidades iniciais são conhecidas. O objectivo do modelo é determinar as ações de expansão das infraestruturas aeroportuárias a aplicar nesses centros de forma a responder da melhor forma possível à procura futura. As ações de expansão podem ser de dois tipos: (i) expansão dos aeroportos existentes, através da adição de novas pistas e da reconfiguração das pistas existentes, e através de melhorias de terminais e áreas de espera, e (ii) desenvolvimento de sistemas multi-aeroporto através da construção de novos aeroportos.

Considere-se a seguinte notação:

Conjuntos:  $N$  = conjunto de centros populacionais (áreas metropolitanas);  $N_{jkr}$  = conjunto de centros contidos no itinerário  $r$  a ligar os centros  $j$  e  $k$ ;  $L$  = conjunto de segmentos;  $L_j$  = conjunto de segmentos com origem no centro  $j$ ;  $L_{jkr}$  = conjunto de segmentos contidos no itinerário  $r$  a ligar os centros  $j$  e  $k$ ;  $R_{jk}$  = conjunto de itinerários a ligar os centros  $j$  e  $k$ ;  $R_l$  = conjunto de itinerários que contêm o segmento  $l$ ; e  $M_j$  = conjunto de ações de expansão aplicáveis ao centro  $j$ .

Parâmetros:  $s_j$  = capacidade inicial do centro  $j$ ;  $g_{jm}$  = aumento de capacidade do centro  $j$  associado à aplicação da ação de expansão  $m$ ;  $e_{jm}$  = custo associado à aplicação da ação de expansão  $m$  ao centro  $j$ ;  $d_{jk}$  = distância de viagem entre os centros  $j$  e  $k$ ; e  $b$  = orçamento disponível para projectos de expansão.

Variáveis de decisão:  $z_j$  = capacidade final do centro  $j$ ;  $y_{jm} = 1$  se a ação de expansão  $m$  é aplicada ao centro  $j$ , e 0 caso contrário;  $q_{jk}$  = número de viagens entre a origem  $j$  e o destino  $k$ ;  $v_{jkr}$  = número de viagens no itinerário  $r$  entre os centros  $j$  e  $k$ ;  $u_{jk}$  = número de viagens no segmento com origem em  $j$  e destino em  $k$ ;  $w_j$  = fluxo de tráfego (partidas) no centro  $j$ ;  $c_{jkr}$  = custo de viagem no itinerário  $r$  entre os centros  $j$  e  $k$ ; e  $c_{jk}$  = custo médio de viagem entre os centros  $j$  e  $k$ .

Usando esta notação, o modelo pode ser formulado do seguinte modo:

$$\max \sum_{j \in N} w_j \quad (1)$$

sujeito a:

$$q_{jk} = \alpha (p_j p_k)^\sigma (i_j i_k)^\varepsilon \phi_{jk}^\delta c_{jk}^{-\beta}, \quad \forall j, k \in N, \quad (2)$$

$$v_{jkr} = \frac{e^{-\gamma c_{jkr}}}{\sum_{p \in R_{jk}} e^{-\gamma c_{jkr}}} q_{jk}, \quad \forall j, k \in N, \quad \forall r \in R_{jk}, \quad (3)$$

$$u_l = \sum_{j \in N} \sum_{k \in N} \sum_{r \in R_l} v_{jkr} + u_l^*, \quad \forall l \in L, \quad (4)$$

$$w_j = \sum_{l \in L_j} u_l + w_j^*, \quad \forall j \in N, \quad (5)$$

$$c_{jkr} = \sum_{l \in L_{jkr}} c \cdot d_l^v u_l^w + \sum_{n \in N_{jkr}} \left[ C_2^{\min} + \left( \frac{w_n}{z_n} \right)^\rho + x_n \right], \quad \forall j, k \in N, \quad \forall r \in R_{jk}, \quad (6)$$

$$z_j \geq w_j, \quad \forall j \in N, \quad (7)$$

$$z_j = s_j + \sum_{m \in M_j} g_{jm} y_{jm}, \quad \forall j \in N, \quad (8)$$

$$\sum_{m \in M_j} y_{jm} \leq 1, \quad \forall j \in N, \quad (9)$$

$$\sum_{j \in N} \sum_{m \in M_j} e_{jm} y_{jm} \leq b, \quad (10)$$

$$y_{jm} \in \{0,1\}, \quad \forall j \in N, \quad \forall m \in M_j. \quad (11)$$

A função objetivo (1) expressa a maximização do total de partidas na rede de aeroportos (maximização da procura coberta). As restrições (2) são a função procura, relacionando o tráfego O-D com a população e o rendimento disponível per capita dos centros populacionais, com o custo médio de transporte entre os centros e com um factor de distribuição modal (explicado adiante). As restrições (3) distribuem o tráfego O-D pelos itinerários em função do custo de viagem segundo uma expressão do tipo *logit* simples. As restrições (4) estabelecem que o tráfego nos segmentos é dado pelo somatório do tráfego nos itinerários contendo esses segmentos. As restrições (5) estabelecem que o tráfego nos centros é dado pelo somatório do tráfego nos segmentos com origem nesses centros. O tráfego nos segmentos e nos centros inclui uma parcela fixa de tráfego (respectivamente,  $u_i^*$  e  $w_j^*$ ) correspondente aos fluxos nos segmentos com origem ou destino nos centros não pertencentes à rede em consideração. As restrições (6) determinam o custo de viagem nos itinerários. O custo de viagem é calculado somando o custo nos segmentos e o custo nos aeroportos incluídos nos itinerários. É assumido que o custo nos segmentos aumenta com a distância de viagem, e, devido a economias de escala, diminui com o fluxo de tráfego. As economias de escala refletem-se no tempo de viagem porque a frequência de serviço aumenta com o tráfego, e no preço, porque as companhias aéreas podem usar aviões de maiores dimensões com menor custo unitário. O custo nos aeroportos inclui uma parcela fixa e uma parcela que aumenta com a taxa de utilização do aeroporto. O custo nos aeroportos pode também incluir uma taxa de congestionamento quando a procura excede a capacidade. As taxas de congestionamento são um mecanismo accionado pela autoridade para gerir a capacidade disponível quando a procura excede a capacidade. As restrições (7) garantem que a capacidade dos aeroportos não é excedida. As restrições (8) estabelecem que a capacidade dos centros é dada pela capacidade inicial, mais um aumento de capacidade associado a uma dada ação de expansão aplicada. As restrições (9) determinam que não será aplicada mais do que uma ação de expansão em cada centro. A restrição (10) assegura que o investimento em ações de expansão não excederá o orçamento disponível. As restrições (11) definem as variáveis de expansão de capacidade como binárias. Os parâmetros  $\alpha$ ,  $\sigma$ ,  $\varepsilon$ ,  $\delta$ ,  $\beta$ ,  $d_{jk\min}$ ,  $d_{jk\max}$ ,  $\gamma$ ,  $c$ ,  $v$ ,  $\varpi$ ,  $C_2^{\min}$  e  $\rho$  são parâmetros de calibração estatística.

O factor de distribuição modal considerado na função de procura (2) é assumido como dependendo apenas da distância entre os centros populacionais, sendo definido por:

$$\phi_{jk} = \begin{cases} 0 & \Leftarrow d_{jk} < d_{jk\min} \\ \left( \frac{d_{jk} - d_{jk\min}}{d_{jk\max} - d_{jk\min}} \right) & \Leftarrow d_{jk\min} \leq d_{jk} < d_{jk\max}, \\ 1 & \Leftarrow d_{jk} \geq d_{jk\max} \end{cases}, \quad \forall j, k \in N,$$

em que  $d_{jk\min}$  designa a distância entre os centros populacionais  $j$  e  $k$  a partir da qual algumas viagens são feitas por ar, e  $d_{jk\max}$  designa a distância a partir da qual todas as viagens são feitas por ar.

O modelo descrito acima é um modelo de otimização inteiro-misto não-linear. Para o resolver

foi desenvolvido um algoritmo heurístico com duas componentes. A componente de expansão de capacidade gera e avalia as ações de expansão a aplicar à rede de aeroportos através de um método do tipo *greedy* (*add + interchange*), e a componente de equilíbrio de tráfego calcula os fluxos e os custos de transporte através do método das médias sucessivas.

#### 4. CALIBRAÇÃO DO MODELO

A simulação do equilíbrio na rede de aeroportos é feita com base nos valores dos parâmetros do modelo. Os parâmetros são, por sua vez, estimados através de calibração estatística, de forma a aproximar tanto quanto possível os fluxos modelados e os fluxos observados para um dado dia de referência. O problema pode ser formulado do seguinte modo:

$$\min \sum_{l \in L} \frac{(u_l - u_l^{obs})^2}{u_l^{obs}} - m \left( \sum_{j \in N} w_j - \sum_{j \in N} w_j^{obs} \right) \quad (12)$$

sujeito a

Restrições (2) – (7)

$$z_j = s_j, \quad \forall j \in N \quad (13)$$

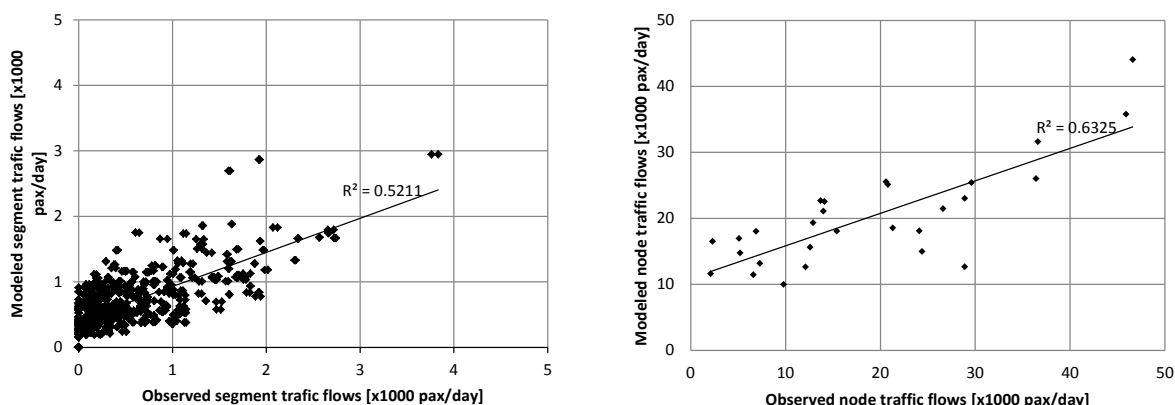
A função-objectivo (12) expressa a minimização do somatório dos desvios quadráticos relativos entre os fluxos observados e os fluxos modelados ao nível dos segmentos, ao que se soma uma parcela que reflete a diferença entre os totais de tráfego modelados e observados. A segunda parcela, afetada por um factor de ponderação,  $m$ , devidamente escolhido, assegura que os fluxos modelados têm uma ordem de grandeza semelhante à dos fluxos observados. As restrições (2) a (7) simulam o equilíbrio na rede (como descrito na Secção 3). As restrições (13) definem a capacidade dos aeroportos para o dia de referência em consideração.

Dada a não-linearidade do modelo e a interdependência entre as restrições, a calibração do modelo foi realizada com recurso ao método de Nelder-Mead (1965). Usando dados relativos ao dia médio dos primeiros três meses de 2008 (últimos dados disponíveis à data de início do estudo), obtiveram-se os seguintes valores para os parâmetros do modelo:  $\alpha = 0.002$ ,  $\sigma = 0.963$ ,  $\varepsilon = 0.939$ ,  $\delta = 0.189$ ,  $\beta = 1.652$ ,  $d_{jk_{min}} = 0.286$ ,  $d_{jk_{max}} = 0.812$ ,  $\gamma = 0.033$ ,  $c = 208.720$ ,  $\nu = 0.396$ ,  $\varpi = -0.056$ ,  $C_2^{min} = 22.651$ , e  $\rho = 1.813$ . Como se constata na Figura 1, os resultados obtidos na calibração são credíveis uma vez que os fluxos de tráfego modelados se aproximam razoavelmente dos fluxos observados. Os coeficientes de correlação para os segmentos, os centros (aeroportos) e os itinerários são de, respectivamente, 0.52, 0.63 e 0.74.

#### 5. EVOLUÇÃO DA REDE

Nesta secção são apresentados os resultados obtidos no estudo sobre a evolução da rede de aeroportos principais do EUA. Esta secção é iniciada pela descrição da situação que serviu de referência ao estudo, e é apresentado o resultado obtido para essa situação de referência. Posteriormente, é descrita a situação de projecto considerada para efeitos de planeamento da expansão da rede de aeroportos, e são referidas a metodologia utilizada para a projecção da população e do rendimento per capita das áreas metropolitanas e a forma de cálculo da componente de tráfego considerada como fixa no modelo. De seguida, é explicada a metodologia utilizada para a definição das possíveis ações de expansão a aplicar às áreas metropolitanas. Finalmente, são apresentados os resultados obtidos no estudo para a situação de projecto considerando vários limites orçamentais para a expansão da rede de aeroportos, e

são comparados os resultados obtidos com as previsões da FAA.



**Figura 1:** Comparação entre os fluxos de tráfego modelados e observados, (a) ao nível dos segmentos e (b) ao nível dos centros

A situação de referência considerada no estudo corresponde ao décimo dia de ponta de 2008. Como foi referido na Secção 4, a calibração estatística dos parâmetros do modelo foi realizada usando dados referentes ao dia médio de operações nos primeiros três meses de 2008. De forma a refletir as condições da situação de referência, o parâmetro  $\alpha$  (incluído na função procura) foi afetado por um factor  $\tau_{jk}$  ( $>1$ ) de forma a refletir o décimo dia de ponta do ano. A parcela fixa de tráfego, correspondente aos fluxos nos segmentos com origem ou destino em centros populacionais não pertencentes à rede em consideração (ver Secção 3), foi igualmente afetada por um factor de ponta. Resolvendo o modelo para estas condições obtém-se a solução de equilíbrio representada na Figura 2. O tráfego nos aeroportos e correspondentes custos encontram-se representados na Tabela 3. Apesar de todas as áreas metropolitanas terem capacidade suficiente para satisfazer a procura, os aeroportos de Atlanta, Charlotte, Houston, Chicago e San Diego operariam a uma taxa de utilização próxima ou superior a 80%, que é um valor comumente assumido como o limite a partir do qual se manifestam problemas significativos de congestionamento. O total de partidas para a solução inicial de equilíbrio é de  $1793.61 \times 10^3$  pax/dia.

O estudo sobre a evolução da rede principal de aeroportos do EUA foi desenvolvido considerando o ano 2030 como o ano de projecto. A população e o rendimento per capita dos centros populacionais para a situação de projecto foram determinados através de modelos de regressão linear usando dados de 1998 a 2008. Relativamente à parcela de tráfego considerada como fixa no modelo, assumiu-se um crescimento de 2.8% por ano para todos os pares O-D, o que é consistente com o indicado em FAA (2010).

A definição das possíveis ações de expansão a aplicar às áreas metropolitanas foi feita em função da possibilidade de adicionar novas pistas aos aeroportos existentes (uma vez que, em geral, as pistas são os elementos críticos das infraestruturas aeroportuárias). Considerou-se o seguinte: (i) a adição de pistas aos aeroportos existentes é feita de forma a coincidir com a direção dominante dos ventos, que se assumiu coincidir com a direção da maioria das pistas; (ii) se não existirem restrições de espaço, é possível adicionar uma pista independente às pistas existentes, aumentando a capacidade em 400 movimentos por dia; (iii) a adição de uma pista paralela próxima e a adição de uma pista paralela mediantemente espaçada a uma pista

independente aumentam a capacidade em 200 e 300 movimentos por dia, respectivamente. Os valores indicados são valores de referência obtidos de projectos de expansão similares. Por outro lado, devido à dificuldade em expandir os aeroportos existentes (os aeroportos encontram-se frequentemente localizados em áreas urbanas consolidadas), foi admitido que é possível construir um aeroporto novo em todas as áreas metropolitanas. As ações de expansão aplicáveis às áreas metropolitanas e os correspondentes aumentos de capacidade são apresentados na Tabela 2(a). Os valores indicados foram obtidos multiplicando a capacidade em número de movimentos por dia pelo número médio de passageiros por movimento. Os custos de expansão são os indicados na Tabela 2(b).

**Tabela 2:** (a) Ações de expansão aplicáveis às áreas metropolitanas e correspondente aumento da capacidade ( $\times 10^3$  pax/ dia); (b) Custo das ações de expansão ( $\times 10^3$  \$M)

Área Metro.	Nível de Expansão					
	1	2	3	4	5	6
Atlanta	38	56	66	75	94	113
Boston	15	23	38	68	83	91
Washington	14	21	35	49	63	91
Cleveland	22	33	39	61	72	78
Charlotte	14	29	58	72	80	87
Cincinnati	10	19	38	48	52	57
Denver	33	49	82	98	106	114
Dallas	16	48	65	73	81	97
Detroit	17	50	67	75	83	100
New York	37	56	66	75	94	112
Miami	38	58	67	77	96	115
Houston	14	42	70	84	91	98
Las Vegas	42	62	73	83	104	125
Los Angeles	35	52	61	70	87	105
Orlando	23	46	58	81	127	151
Chicago	32	49	57	65	81	97
Memphis	8	23	31	35	38	46
Minneapolis	17	50	67	75	83	100
Portland	13	39	52	58	65	78
Philadelphia	15	30	38	68	83	91
Phoenix	18	55	73	82	91	110
Pittsburgh	12	35	47	53	58	70
San Diego	36	54	63	72	90	108
Seattle	21	62	83	93	104	124
San Francisco	17	25	58	75	84	92
Salt Lake City	12	36	49	55	61	73
Saint Louis	12	36	49	55	61	73
Tampa	20	40	60	100	121	131

Área Metro.	Nível de Expansão					
	1	2	3	4	5	6
Atlanta	8	10	12	14	16	18
Boston	6	8	14	8	10	12
Washington	6	8	14	23	26	34
Cleveland	9	15	17	8	10	12
Charlotte	6	8	8	10	12	14
Cincinnati	6	8	8	10	12	14
Denver	9	12	8	10	12	14
Dallas	6	8	10	12	14	16
Detroit	6	8	10	12	14	16
New York	8	10	12	14	16	18
Miami	8	10	12	14	16	18
Houston	6	15	8	10	12	14
Las Vegas	8	10	12	14	16	18
Los Angeles	8	10	12	14	16	18
Orlando	6	9	12	14	8	10
Chicago	8	10	12	14	16	18
Memphis	5	8	10	12	14	16
Minneapolis	6	8	10	12	14	16
Portland	6	8	10	12	14	16
Philadelphia	6	6	8	8	10	12
Phoenix	5	8	10	12	14	16
Pittsburgh	5	8	10	12	14	16
San Diego	8	10	12	14	16	18
Seattle	5	8	10	12	14	16
San Francisco	9	12	8	10	12	14
Salt Lake City	5	8	10	12	14	16
Saint Louis	5	8	10	12	14	16
Tampa	6	12	18	8	10	12

Para a situação de projecto atrás definida, e assumindo que a rede de aeroportos não sofreria quaisquer alterações ( $b=0$ ), dez áreas metropolitanas ficariam sem capacidade suficiente para satisfazer a procura. Para as cinco áreas metropolitanas que exibiam problemas de congestionamento em 2008, a autoridade de transporte aéreo teria de cobrar um mínimo de \$151 por passageiro de forma a regular a utilização de capacidade. New York, Las Vegas, Memphis, Phoenix e Seattle também ficariam sem capacidade suficiente para satisfazer toda a procura, e deveria ser aplicada uma taxa de congestionamento a variar entre \$5.59 e \$82.88 por passageiro. Em Washington, Dallas, Miami, Minneapolis e Philadelphia, a procura igualaria praticamente a capacidade, mas não seria necessário cobrar uma taxa de congestionamento. O total de partidas aumentaria para  $2609.36 \times 10^3$  pax/dia, o que

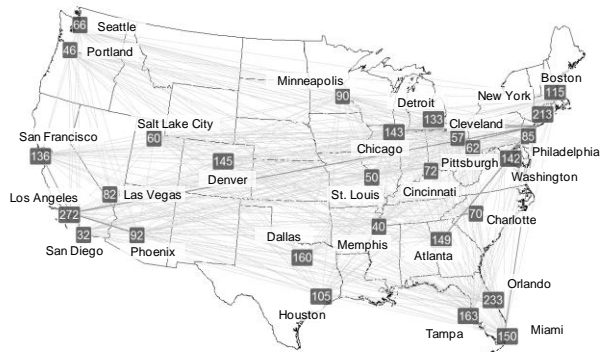


corresponde a um aumento de cerca de 45% relativamente a 2008.

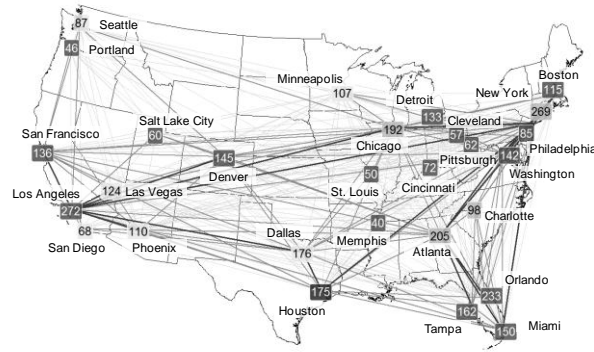
Considerando um orçamento de 100 mil milhões de dólares para a expansão da rede de aeroportos, o estudo apontou para aumentos de capacidade em onze áreas metropolitanas. Las Vegas, Seattle, San Diego, Phoenix, Dallas e Minneapolis deveriam ser expandidos em um nível de capacidade (um aeroporto novo com uma pista seria construído em Las Vegas e em Seattle). New York, Chicago, Charlotte e Atlanta deveriam ser expandidos em dois níveis de capacidade (um aeroporto novo com duas pistas paralelas próximas seria construído em New York, Chicago e Atlanta). Houston deveria ser expandido em três níveis de capacidade (um novo aeroporto com uma pista seria construído, e uma nova pista seria adicionada a Houston Intercontinental/IAH e a Houston Hobby/HOU). Estas áreas metropolitanas teriam, assim, capacidade suficiente para satisfazer toda a procura. Por outro lado, nos casos de Washington, Memphis e Philadelphia, que não seriam expandidos, deveriam ser aplicadas taxas de congestionamento de \$6.74, \$31.27 e \$4.41 para regular a capacidade existente. O total de partidas aumentaria para  $2934.56 \times 10^3$  pax/dia, o que corresponde a um aumento de cerca de 64% relativamente à situação de referência, e a aproximadamente 12% relativamente à solução de orçamento nulo para 2030.

Aumentando em 200 mil milhões de dólares o orçamento para intervenção, novos aumentos de capacidade seriam possíveis. Los Angeles, Denver, St. Louis e Washington deveriam ser expandidos em um nível de capacidade (um aeroporto novo com uma pista seria construído em Los Angeles). Seattle, San Diego, Phoenix, Minneapolis, Dallas, Memphis, Miami e Philadelphia seriam expandidas em dois níveis de capacidade (um aeroporto novo com uma pista seria construído em Seattle, Phoenix, Minneapolis, Dallas e Memphis, e um aeroporto novo com duas pistas paralelas próximas seria construído em Miami e em San Diego). Chicago e Charlotte seriam expandidos em três níveis de capacidade (um novo aeroporto com uma pista seria construído em Charlotte, e o novo aeroporto de Chicago seria expandido para um aeroporto com duas pistas paralelas mediantemente espaçadas). Com estas modificações, todas as áreas metropolitanas teriam capacidade suficiente para satisfazer toda a procura. O total de partidas aumentaria para  $3003.04 \times 10^3$  pax/dia, o que corresponde a um aumento de um pouco mais de 67% relativamente a 2008, e a cerca de 15% relativamente à solução de orçamento nulo para 2030.

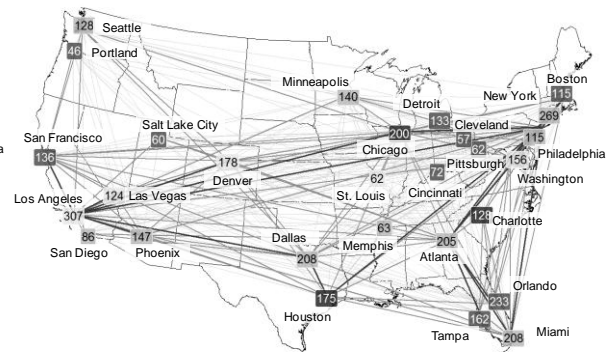
Os resultados do estudo foram comparados com os resultados apresentados no estudo FACT 2 da FAA, *Capacity Needs in the National Airspace System: An Analysis of Airports and Metropolitan Area Demand and Operational Capacity in the Future* (FAA, 2007). Este estudo foi desenvolvido com o propósito de determinar quais os aeroportos e áreas metropolitanas que não terão capacidade suficiente para acomodar a procura futura. À excepção de Los Angeles, todas as áreas metropolitanas identificadas no estudo como tendo problemas de congestionamento são as mesmas identificadas pelo FACT 2 como necessitando de capacidade adicional. Apesar dos resultados serem semelhantes, os planos previstos pela FAA não permitem resolver os problemas de congestionamento em algumas áreas metropolitanas. De acordo com o nosso estudo, Dallas, Memphis, Portland, Salt Lake City e Saint Louis continuarão a exibir problemas de congestionamento se apenas os projectos de expansão previstos pela FAA forem executados.



**Figura 2:** Rede de aeroportos em 2008



**Figura 3:** Rede de aeroportos em 2030  
para  $b=\$100 \times 10^3$  M



**Figura 4:** Rede de aeroportos em 2030  
para  $b=\$200 \times 10^3$  M

**Tabela 3:** Tráfego e custo dos aeroportos em 2030 para  $b=\$0$

Área Metro.	Capacidade	Tráfego	Rácio	Taxa	Custo
Atlanta	149	118	79%	0.00	69.34
Boston	115	56	49%	0.00	42.37
Washington	142	88	62%	0.00	52.77
Cleveland	57	30	52%	0.00	44.55
Charlotte	70	57	82%	0.00	73.24
Cincinnati	72	38	53%	0.00	45.19
Denver	145	69	48%	0.00	41.44
Dallas	160	98	62%	0.00	52.47
Detroit	133	63	48%	0.00	41.42
New York	213	153	72%	0.00	62.37
Miami	150	89	59%	0.00	50.55
Houston	105	87	83%	0.00	73.44
Las Vegas	82	51	62%	0.00	52.90
Los Angeles	272	113	42%	0.00	37.35
Orlando	233	54	23%	0.00	27.72
Chicago	143	116	81%	0.00	72.25
Memphis	40	28	70%	0.00	60.54
Minneapolis	90	59	65%	0.00	55.79
Portland	46	27	59%	0.00	50.71
Philadelphia	85	55	65%	0.00	55.84
Phoenix	92	59	64%	0.00	54.83
Pittsburgh	62	27	43%	0.00	38.24
San Diego	32	29	90%	0.00	81.87
Seattle	66	49	74%	0.00	64.01
San Francisco	136	72	53%	0.00	45.36
Salt Lake City	60	34	57%	0.00	48.95
Saint Louis	50	33	67%	0.00	57.12
Tampa	163	41	25%	0.00	28.66

**Tabela 4:** Tráfego e custo dos aeroportos em 2030 para  $b=\$100 \times 10^3$  M

Área Metro.	Capacidade	Tráfego	Rácio	Taxa	Custo
Atlanta	205	202	98%	0.00	92.29
Boston	115	85	74%	0.00	64.68
Washington	142	142	100%	6.74	94.62
Cleveland	57	42	73%	0.00	63.63
Charlotte	99	98	100%	0.00	94.20
Cincinnati	72	58	80%	0.00	70.42
Denver	145	115	80%	0.00	70.16
Dallas	176	165	94%	0.00	86.74
Detroit	133	96	72%	0.00	62.26
New York	269	252	94%	0.00	86.84
Miami	150	149	100%	0.00	94.44
Houston	175	152	87%	0.00	78.38
Las Vegas	124	91	73%	0.00	63.59
Los Angeles	272	186	68%	0.00	58.85
Orlando	233	94	40%	0.00	36.42
Chicago	192	191	100%	0.00	94.30
Memphis	40	40	100%	31.27	94.62
Minneapolis	107	95	89%	0.00	80.90
Portland	46	43	93%	0.00	85.20
Philadelphia	85	85	100%	4.41	94.62
Phoenix	110	101	92%	0.00	84.13
Pittsburgh	62	36	58%	0.00	49.52
San Diego	68	50	74%	0.00	64.13
Seattle	87	81	93%	0.00	86.02
San Francisco	136	113	84%	0.00	74.56
Salt Lake City	60	57	95%	0.00	88.74
Saint Louis	50	48	95%	0.00	88.18
Tampa	163	68	42%	0.00	37.42

**Tabela 5:** Tráfego e custo dos aeroportos em 2030 para  $b=\$200 \times 10^3$  M

Área Metro.	Capacidade	Tráfego	Rácio	Taxa	Custo
Atlanta	205	203	99%	0.00	93.06
Boston	115	87	75%	0.00	65.81
Washington	156	147	94%	0.00	86.93
Cleveland	57	42	75%	0.00	64.87
Charlotte	128	101	79%	0.00	70.10
Cincinnati	72	58	81%	0.00	71.61
Denver	178	118	66%	0.00	56.85
Dallas	208	169	81%	0.00	72.04
Detroit	133	97	73%	0.00	63.07
New York	269	254	95%	0.00	87.70
Miami	208	155	75%	0.00	64.85
Houston	175	154	88%	0.00	79.37
Las Vegas	124	92	74%	0.00	64.34
Los Angeles	307	190	62%	0.00	52.73
Orlando	233	95	41%	0.00	36.75
Chicago	200	194	97%	0.00	90.70
Memphis	63	46	73%	0.00	63.59
Minneapolis	140	99	71%	0.00	60.95
Portland	46	43	93%	0.00	86.18
Philadelphia	115	90	79%	0.00	69.08
Phoenix	147	105	71%	0.00	61.81
Pittsburgh	62	37	59%	0.00	50.67
San Diego	86	52	61%	0.00	51.88
Seattle	128	85	66%	0.00	56.81
San Francisco	136	114	84%	0.00	75.63
Salt Lake City	60	58	96%	0.00	89.76
Saint Louis	62	50	81%	0.00	71.82
Tampa	163	69	43%	0.00	37.96

## 6. CONCLUSÃO

Neste artigo, são apresentados os resultados de um estudo sobre a evolução da rede principal de aeroportos dos EUA. O estudo baseou-se num modelo de otimização destinado a auxiliar as autoridades de transporte aéreo nas suas reflexões estratégicas relativas ao desenvolvimento de redes de aeroportos no longo prazo. O modelo aplica-se a um conjunto de áreas metropolitanas servidas por aeroportos ou sistemas multi-aeroporto, e determina as ações de expansão a aplicar aos aeroportos de forma a responder da melhor forma possível à procura futura com um dado orçamento. Neste caso foi considerada a rede constituída pelas 28 áreas metropolitanas que contêm os 33 aeroportos com maior utilização, servindo mais de 250 mil voos por ano. Estes aeroportos concentram uma grande parte do total de tráfego dos EUA, pelo que, dada a sua capacidade limitada, apresentam problemas de congestionamento significativos. Por sua vez, os problemas de congestionamento nestes aeroportos propagam-se pela restante rede de aeroportos sob a forma de atrasos. Os aeroportos secundários localizados nessas áreas metropolitanas também foram incluídos no estudo de forma a captar a dinâmica da procura regional em torno dos sistemas multi-aeroporto.

De acordo com o estudo, se a rede de aeroportos não sofrer alterações, dez áreas metropolitanas não terão capacidade suficiente para satisfazer toda a procura em 2030, e outras cinco áreas metropolitanas terão graves problemas de congestionamento, fazendo com que o tráfego não possa aumentar mais de cerca de 45% relativamente a 2008. Considerando um orçamento de 100 mil milhões de dólares, o estudo aponta que a capacidade de onze áreas metropolitanas deveria ser aumentada, nomeadamente através da construção de um aeroporto novo com uma pista em Las Vegas, Seattle e Houston, e de um aeroporto novo com duas pistas paralelas próximas em New York, Chicago e Atlanta. Se estas alterações fossem concretizadas, o tráfego aumentaria aproximadamente 64% relativamente a 2008. Para um orçamento de 200 mil milhões de dólares, a capacidade de dezoito áreas metropolitanas deveria ser aumentada. Para além dos aeroportos referidos, deveria ser construído um aeroporto novo com uma pista em Los Angeles, Phoenix, Minneapolis, Dallas, Memphis e Charlotte, um aeroporto novo com duas pistas próximas em Miami e San Diego, e o novo aeroporto de Chicago deveria ter duas pistas paralelas mediantemente espaçadas. Se estas alterações fossem concretizadas, o tráfego aumentaria um pouco mais de 67% relativamente a 2008. Estes resultados foram comparados com os obtidos pelo estudo FACT 2 da FAA, tendo-se verificado que eles são semelhantes em muitos aspectos. No entanto, os planos propostos pela FAA para melhorar a actual rede de aeroportos são aparentemente insuficientes para resolver os problemas de congestionamento em Dallas, Memphis, Portland, Salt Lake City e Saint Louis.

Embora o estudo que realizámos já forneça boas indicações relativamente à forma como a evolução da rede de aeroportos principais dos EUA deve ser feita, há vários aspectos que podem ser melhorados. Em particular, é possível melhorar a função da procura através da inclusão de novas variáveis, aprofundar a análise das ações de expansão, e ponderar vários cenários relativos ao crescimento da procura. Estes aspectos serão objecto de investigação a desenvolver no futuro próximo.

### Agradecimentos

Este estudo foi desenvolvido no âmbito do projecto de investigação *AirNets: Implications of Congestion for the Configuration of Airport Networks and Airline Networks* do Programa MIT-Portugal. Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) o financiamento do projecto. O primeiro autor agradece também a bolsa de doutoramento (SFRH/BD/44233/2008).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- FAA (2007) *Capacity Needs in the National Airspace System: An Analysis of Airports and Metropolitan Area Demand and Operational Capacity in the Future*, Federal Aviation Administration, Washington DC, USA.
- FAA (2010) *Aerospace Forecasts FY 2011-2031*, Federal Aviation Administration, Washington DC, USA.
- FAA (2011a) Terminal Area Forecasts. Available at: <http://aspm.faa.gov/main/taf.asp> (July 16, 2011).
- FAA(2011b) *Aviation System Performance Metrics (ASPM), Airline Service Quality Performance (ASQP)*- Available at: <http://aspm.faa.gov/aspm/entryASPM.asp> (July 16, 2011).
- Hansen, P. e Mladenovic, N. (2001) Variable neighborhood search: principles and applications, *European Journal of Operational Research* 130, 449-467.
- ICAO (2005) *Annual Review of Civil Aviation 2005*, International Civil Aviation Organization (ICAO). Montreal, Canada.
- Ishutkina, M. A. e Hansman R. J. (2009) *Analysis of the Interaction between Air Transportation and Economic Activity*, PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge MA
- Mozdzanowska, A. (2008) *System Transition: Dynamics of Change in the US Air Transportation System*, PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge MA
- NASA-FAA (2003) *Socio-Economic Demand Forecast Study*. National Aeronautics and Space Administration and Federal Aviation Administration, Washington DC, USA.
- NEXTOR (2010) *Total Delay Impact Study: A Comprehensive Assessment of the Costs and Impacts of Flight Delay in the United States*. National Center of Excellence for Aviation Operations Research, Federal Aviation Administration, Washington DC, USA.
- Nelder J. A. e Mead R. (1965) A simplex method for function minimization, *Computer Journal* 7, 308-313.
- Santos, M. e Antunes, A. (2010) An optimization model for the expansion of an airport network, *Proceedings of the 12<sup>th</sup> World Conference on Transportation Research* (pen drive), Lisbon, Portugal.