

OTIMIZAÇÃO DE REDES DE TRANSPORTE AÉREO OPERADAS EM REGIME DE SERVIÇO PÚBLICO

João Pedro Pita

António Pais Antunes

Departamento de Engenharia Civil
Universidade de Coimbra

RESUMO

As redes de transporte aéreo operadas em regime de serviço público são essenciais para garantir a acessibilidade a regiões remotas. Estas redes devem ser definidas tendo em conta, por um lado, o nível de serviço oferecido às populações e, por outro, os custos totais da rede (ou seja, os custos de operação da companhia que fornece o serviço e os custos do tempo de viagem dos passageiros). Neste artigo apresenta-se um modelo integrado de gestão de frotas e construção de horários que permite minimizar os custos totais da rede cumprindo as obrigações de serviço público para ela definidas. A utilidade do modelo é ilustrada através de uma aplicação à rede da Região dos Açores (Portugal).

ABSTRACT

Air transportation networks operated under public service obligations are very important to guarantee accessibility to remote regions. These networks should be defined taking into account the level of service offered to the population and the total network costs (that is, the operating costs of the airline providing the service and the travel time costs incurred by passengers). In this article, we present an integrated flight scheduling and fleet assignment model that minimizes the total network costs while complying with the applicable public service obligations. The usefulness of the model is illustrated with an application to the network of Azores (Portugal).

1. INTRODUÇÃO

Depois da liberalização do transporte aéreo na América do Norte e na Europa, com o aumento da competição entre companhias, assistiu-se a uma redução do preço das passagens aéreas e a um aumento do volume de viagens nos mercados mais importantes, não obstante os tempos de viagem terem em muitos casos aumentado pelo facto de um grande número de companhias ter adoptado uma estrutura de hub-and-spoke para as respectivas redes. Ao mesmo tempo, os mercados menos importantes (não lucrativos e/ou de baixa procura) passaram a ser mais mal servidos ou, simplesmente, deixaram de sê-lo (Reynolds-Freighan, 1995). Esta evolução teve implicações especialmente negativas em regiões remotas, pelas dificuldades levantadas à mobilidade de pessoas e bens, e inerentes consequências em termos económicos, em particular no sector turístico (Graham, 2003).

No sentido de combater a quebra de oferta de transporte aéreo em regiões de baixa procura (e, em particular, em regiões remotas), têm sido postos em prática sistemas de subsidiação nos países afectados por problemas desta natureza (Santana, 2009). Em 2010, existiam no mínimo 260 rotas – o número varia com a época do ano – que beneficiavam de subsídios destinados a promover a coesão social e regional, tanto a nível nacional como a nível da União Europeia. Nos Estados Unidos, há sistemas análogos – Essential Air Service Program (EAS) e Small Communities Air Service Development Program (SCASD) – que servem populações afastadas dos aeroportos principais. Em 2009, estes sistemas abrangiam um total de 122 comunidades (Metrass-Mendes e De Neufville, 2010).

Na União Europeia, os subsídios são atribuídos desde 1993 quer pelos governos quer por outras entidades públicas, nos termos do Regulamento nº 2408/92 do Conselho das

Comunidades Europeias (CEC, 1992) e das Obrigações de Serviço Público (OSP) definidas para o transporte aéreo. Presentemente, existem rotas subsidiadas em oito países da União Europeia, na Noruega e na Islândia. Nestas rotas as companhias aéreas são financiadas para oferecer serviços regulares a favor de regiões remotas. A França e a Noruega são os países com mais rotas subsidiadas, enquanto Portugal é o país onde estes subsídios são mais utilizados – em 2001, 40% das viagens efectuadas dentro de Portugal tiveram lugar em rotas subsidiadas, enquanto que o valor equivalente para a França, Noruega e Escócia foi de apenas 10%. O valor do subsídio por passageiro difere também fortemente de país para país, tendo variado em 2000 entre 21.77€ na França e 135.57€ na Alemanha (Williams e Pagliari, 2004).

O tema do transporte aéreo para/de regiões remotas tem sido objeto de um esforço significativo de investigação no que respeita à escolha dos mecanismos de subsidiação e à análise do impacto dos subsídios (Santana, 2009; Metrass-Mendes e De Neufville, 2010; Braathen, 2011). No entanto, tanto quanto sabemos, não existem trabalhos publicados na literatura sobre modelos de planeamento operacional de redes de transporte aéreo operadas em regime de serviço público – como o modelo de optimização integrada de gestão de frota e construção de horários (*flight scheduling and fleet assignment*) que apresentamos neste artigo. A utilidade do modelo é ilustrada através de uma aplicação à rede de transporte aéreo dos Açores (Portugal), um arquipélago de nove ilhas com 2333 km² e aproximadamente 245 mil habitantes, situado no Oceano Atlântico, cerca de 1500 km a oeste de Lisboa.

2. MODELO DE OTIMIZAÇÃO

A gestão de frotas e a construção de horários constituem duas das actividades mais importantes (e complexas) dos processos de planeamento operacional relativos ao transporte aéreo. São ambas actividades em que, desde há muito tempo, se recorre à utilização de modelos de optimização. No entanto, na maioria desses modelos as duas actividades são tratadas de forma separada (não integrada). Na vasta literatura sobre modelos de gestão de frotas pontificam trabalhos como Abara (1989), Hane et al. (1995) e Barnhart et al. (2002). A literatura dedicada à construção de horários é também muito extensa, merecendo destaque trabalhos como Erdmann et al. (2001), Berge e Hopperstad (1993) e Barnhart e Kim (2005). Relativamente aos modelos integrados, há a destacar as contribuições de Lohatenapont e Barnhart (2004) e Yan et al. (2008). Estes modelos são bastante mais complexos, mas permitem identificar soluções significativamente mais lucrativas para as companhias.

Todos estes modelos têm por destinatário as companhias aéreas, facto que desde logo os diferencia do modelo integrado que apresentamos adiante. No caso deste modelo, que é dirigido às autoridades aeronáuticas, o objetivo é determinar a forma de operar a rede (utilização de aeronaves e horário de voos) que minimiza os custos totais de servir a população, ao mesmo tempo que cumpre com as obrigações de serviço público – as quais se admite serem expressas em termos de um número mínimo de voos diretos a disponibilizar entre aeroportos e do limite mínimo de lugares a oferecer nesses voos. A procura de viagens é um parâmetro do modelo, pois que se admite depender de preços de passagens aéreas estabelecidos administrativamente. Os custos considerados são os custos de operação da companhia que fornece o serviço e os custos de tempo para os passageiros (em voo e à espera em aeroportos intermédios). O modelo está concebido para ser aplicado num dado período de operações (um dia, uma semana), subdividido em intervalos curtos de tempo (10, 15, 20, 30 minutos).

Na formulação do modelo utiliza-se a seguinte notação:

Conjuntos: $A = \{1, \dots, A\}$ - aeroportos regionais; $E = \{1, \dots, E\}$ - aeroportos externos com voos de/para a região; $D = \{1, \dots, D\}$ - dias de operação; $T = \{1, \dots, T\}$ - períodos de tempo (em cada dia de operação); $F = \{1, \dots, F\}$ - tipos de aeronaves a operar na região.

Parâmetros: c_{Vjfk} - custo de operação de uma aeronave de tipo f na ligação jk (€/voo); c_{Vjkf} - custo de manter uma aeronave de tipo f estacionada fora da base no aeroporto j (€/min); c_{W_jhk} - custo do tempo de espera de um passageiro no itinerário jhk (€/pax); c_{T_jk} - custo do tempo em voo por passageiro na ligação jk (€/pax); c_{Af} - custo unitário do leasing de aeronaves do tipo f para os dias de operação (€/aircraft); $c_T^{MIN}_j$ - tempo de ligação mínimo para os passageiros no aeroporto j (medido em períodos de tempo); $c_T^{MAX}_j$ - tempo de ligação máximo para os passageiros no aeroporto j (medido em períodos de tempo); t_{jk} - tempo de voo entre os aeroportos j e k ; lf_{jk} - *load factor* máximo na ligação jk ; n_f - número de aeronaves do tipo f ; d_{jkd} - procura origem-destino jk no dia d ; s_{Vf} - capacidade de uma aeronave do tipo f ; d_{ekdt}^{IN} - procura externa à região com origem no aeroporto externo e e destino ao aeroporto interno k com chegada prevista no dia d e período de tempo t ; d_{ket}^{OUT} - procura externa à região com origem no aeroporto interno j e destino ao aeroporto externo e com saída prevista no dia d e período de tempo t ; X_{jk}^{MIN} - número mínimo de voos na ligação jk pelas regras de serviço público; S_{jk}^{MIN} - número mínimo de lugares na ligação jk pelas regras de serviço público.

Variáveis de Decisão: q_{jkdt}^N - passageiros em rotas diretas entre os aeroportos j e k no dia d e período de tempo t ; q_{jhkdt}^{C1} - passageiros no itinerário $j-h-k$ que partem do aeroporto j para o hub h no dia d e período de tempo t ; q_{jhkdt}^{C2} - passageiros no itinerário $j-h-k$ que partem do hub h para o aeroporto k no dia d e período de tempo t ; q_{ejkdt}^{IN} - passageiros no itinerário $e-j-k$ que voam do aeroporto externo e para o hub j e deste para o aeroporto k partindo de j no dia d e período de tempo t ; q_{kjedt}^{OUT} - passageiros no itinerário $k-j-e$ que voam do aeroporto k para o hub j e deste para o aeroporto externo e partindo do aeroporto k para o hub j no dia d e período de tempo t ; x_{jkfdt} - número de voos por aeronaves do tipo f na ligação jk que partem no dia d e período de tempo t ; $w_{jhkdtt'}$ - passageiros do itinerário $j-h-k$ à espera no aeroporto h e dia d que aterram no aeroporto h no período de tempo t e partem de h no período de tempo t' ; $w_{ejkdtt'}^{IN}$ - passageiros no itinerário externo $e-j-k$ à espera no aeroporto j e dia d que aterram no aeroporto j no período de tempo t e partem de j no período de tempo t' ; $w_{kjedtt'}^{OUT}$ - passageiros no itinerário externo $k-j-e$ à espera no aeroporto j e dia d que aterram no aeroporto j no período de tempo t e partem de j no período de tempo t' ; a_f - número de aeronaves do tipo f em regime de leasing; y_{jfdt} - número de aeronaves do tipo f que estão prontas a descolar do aeroporto j no dia d e período de tempo t .

Utilizando a notação anterior, a função-objectivo (1) do modelo pode ser formulada como segue:

$$\begin{aligned}
\min Cost = & \sum_{j,k \in A} \sum_{f \in F} \sum_{d \in D} \sum_{t \in T} (c_{Vj kf} \times x_{jk f dt}) + \\
& \sum_{j \in A} \sum_{f \in F} \sum_{d \in D} \sum_{t \in T} (c_{Oj f} \times y_{j f dt}) + \\
& + \sum_{j,h,k \in A} \sum_{d \in D} \sum_{t \in T} (q_{j k dt}^N + q_{j k h dt}^{C1} + q_{h j k dt}^{C2}) \times t_{jk} \times c_{T_{jk}} + \\
& + \sum_{j,k \in A} \sum_{e \in E} \sum_{d \in D} \sum_{t \in T} (q_{e j k dt}^{IN} + q_{j k e dt}^{OUT}) \times t_{jk} \times c_{T_{jk}} + \\
& + \sum_{j,h,k \in A} \sum_{d \in D} \sum_{t \in T} \sum_{t' \in T: t' > t + c_{T_j}^{MIN}, t' < t + c_{T_j}^{MAX}} c_{W_{jh k}} \times w_{jh k dt t'} \times (t' - t - c_{T_j}^{MIN}) + \\
& + \sum_{j,k \in A} \sum_{e \in E} \sum_{d \in D} \sum_{t \in T} \sum_{t' \in T: t' > t + c_{T_j}^{MIN}, t' < t + c_{T_j}^{MAX}} c_{W_{e j k}} \times (w_{e j k dt t'}^{IN} + w_{j k e dt t'}^{OUT}) \times (t' - t - c_{T_j}^{MIN}) \\
& + \sum_{f \in F} c_{Af} \times a_f
\end{aligned} \tag{1}$$

A função-objetivo (1) representa a minimização dos custos totais da rede – custos de operação da companhia, custo em tempo para os passageiros e custos com o leasing de aeronaves. Os custos de operação para a companhia estão divididos em duas parcelas: os custos de voar entre aeroportos e os custos de ter uma aeronave estacionada num aeroporto remoto (relativamente às bases de operações da companhia). Os custos em tempo para os passageiros estão divididos em quatro parcelas: custos do tempo em voo para os passageiros em itinerários internos à região; custos do tempo em voo para os passageiros em itinerário de/para o exterior da região; custos do tempo de espera para os passageiros em itinerários internos; custos do tempo de espera para os passageiros em itinerário de/para o exterior da região. Os custos com o leasing de aeronaves estimam-se como iguais ao custo unitário do leasing multiplicado pelo número de aeronaves a operar nestas condições.

A otimização da função-objetivo está sujeita a 16 conjuntos de restrições. Algumas são as habituais nos modelos em causa, mas as restrições de procura foram adaptadas para ter em conta o facto da rede ser operada em regime de serviço público. Além disso, novas restrições foram desenvolvidas para estimar o tempo de espera de cada passageiro no hub. Seguidamente apresenta-se a formulação e explicação de cada conjunto de restrições.

$$\sum_{k \in A} \sum_{d \in D} \sum_{t \in T} x_{jk f dt} = \sum_{k \in A} \sum_{d \in D} \sum_{t \in T} x_{kj f dt}, \forall j \in A, f \in F \tag{2}$$

As restrições (2) garantem que no fim do período de operações (e.g., uma semana) o número de descolagens e aterragens num dado aeroporto j para cada tipo de aeronave f seja o mesmo. Isto permite que o sistema seja cíclico. A restrição pode ser adaptada para que o ciclo de operações seja o desejado (e.g., um dia).

$$\sum_{j \in A} y_{j f dt} + \sum_{j,k \in A} x_{jk f dt} + \sum_{j,k \in A} \sum_{r \in T: r > t, r < t + t_{jk}} x_{jk f dr} = n_f + a_f, \forall f \in F, d \in D, t \in T \tag{3}$$

As restrições (3) limitam o uso de aeronaves de cada tipo à frota disponível – seja frota própria da companhia ou operada em regime de leasing. Para cada tipo de aeronave f num dado período t , o somatório do número de aeronaves estacionadas, das aeronaves que descolaram no período t e das aeronaves que estão em voo no período t é igual ao somatório das aeronaves disponíveis.

$$\sum_{k \in A} x_{jkfdt} \leq \sum_{k \in A} x_{kjfd, t-t_{kj}} + y_{jfd, t-1}, \forall j \in A, f \in F, d \in D, t \in T \quad (4)$$

$$\sum_{k \in A} x_{jkfd1} \leq \sum_{k \in A} x_{kjfd, T-t_{kj}} + y_{jfdT}, \forall j \in A, f \in F, d \in D, t \in T \quad (5)$$

$$y_{jfdT} = y_{jfd1}, \forall j \in A, f \in F \quad (6)$$

As restrições (4) e (5) garantem a continuidade em cada aeroporto, para cada tipo de aeronave e em cada período de tempo. O número de descolagens por aeroporto j , tipo de aeronave f , dia d e período de tempo t é, no máximo, igual à soma das aeronaves que estavam estacionadas no período de tempo $t-1$ com as que aterraram no período t . Se pretendermos garantir uma rede cíclica (e.g., semanal ou diária) a equação (6) garante essa continuidade.

$$\sum_{f \in F} x_{jkfdt} \times s_{vf} \times lf_{jk} \geq q_{jkdt}^N + \sum_{h \in A} (q_{jhkd}^{CI} + q_{hjkd}^{CI}) + \sum_{e \in E} (q_{ejkd}^{IN} + q_{jked}^{OUT}) \quad \forall j, k \in A, d \in D, t \in T \quad (7)$$

A restrição (7) limita o número de passageiros atribuídos a cada voo ao número de lugares disponíveis. O número de lugares disponíveis é igual ao número total de lugares disponíveis para voos em cada ligação jk multiplicado pelo *load factor* (lf_{jk}) máximo nessa ligação – membro esquerdo da inequação. O número de passageiros atribuídos por voo é igual ao somatório dos passageiros diretos entre jk , com os passageiros internos em itinerários que usam a ligação jk e com os passageiros externos em itinerários que também usam a ligação jk (Figura 2). A equação pode ser adaptada para vários desenhos de rede e para vários limites máximos de voos por itinerário (neste caso apenas permitimos itinerários com um máximo de dois voos). Para fazer face à incerteza na procura diária o *load factor* máximo pode ser definido para um limite abaixo de 1, o que é especialmente importante em O/D com baixa procura média (Swan, 2002).

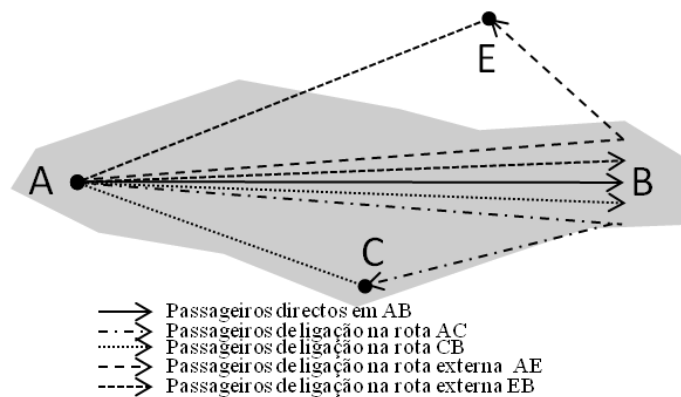


Figura 1: Passageiros em diferentes rotas/mercados numa dada ligação aérea

$$d_{jkdt} = \sum_{t \in T} q_{jkdt}^N + \sum_{h \in A} \sum_{t \in T} q_{jhkd}^{CI}, \forall j, k \in A, d \in D \quad (8)$$

$$d_{ekdt}^{IN} = \sum_{j \in A} \sum_{t' \in T : t' > t + c_{Tj}^{MIN}, t' < t + c_{Tj}^{MAX}} q_{ejkdt'}^{IN}, \forall k \in A, e \in E, d \in D, t \in T \quad (9)$$

$$d_{kedt}^{OUT} = \sum_{j \in A} \sum_{t' \in T : t' < t + c_{Tj}^{MIN}, t' > t + c_{Tj}^{MAX}} q_{kjedt'}^{OUT}, \forall k \in A, e \in E, d \in D, t \in T \quad (10)$$

As restrições (8), (9) e (10) garantem a cobertura da procura para cada par O/D, a continuidade das viagens para os passageiros de ligação e a definição dos passageiros em espera numa escala da viagem. A equação de procura (8) iguala a procura para cada par O/D ao somatório dos passageiros directos e em itinerários de ligação (Figura 3). Para passageiros em itinerários externos à região as equações (9) e (10) garantem igualmente que a procura de/para a região é satisfeita.

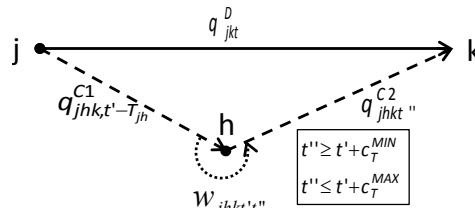


Figura 2: Continuidade dos passageiros em aeroportos intermédios

$$q_{jhkt}^{C2} \leq \sum_{t' \in T : t' < t + c_{Tj}} q_{jhkt'}^{C1} - \sum_{t'' \in T : t'' < t} q_{jhkt''}^{C2}, \forall j, k \in A, h \in A, d \in D, t \in T \quad (11)$$

As restrições (11) asseguram a continuidade dos passageiros para cada par O/D jk e para cada aeroporto hub h . O número máximo de passageiros para cada par O/D jk atribuídos à segunda ligação é no máximo igual ao número de passageiros à espera no aeroporto h pertencentes a esse O/D.

$$\sum_{t' \in T : t' < t - c_{Tj}^{MIN}, t' \geq t - c_{Tj}^{MAX}} w_{jhkt't} = q_{jhkt}^{C2}, \forall j, h, k \in A, d \in D, t \in T \quad (12)$$

$$\sum_{t' \in T : t' \leq t - c_{Tj}^{MAX}, t' > t + c_{Tj}^{MIN}} w_{jhkt't} = q_{jhkt}^{C1}, \forall j, h, k \in A, d \in D, t \in T \quad (13)$$

$$\sum_{t' \in T : t' > t + c_{Tj}^{MIN}, t' < t + c_{Tj}^{MAX}} w_{ejkdt'}^{IN} = q_{ejkdt}^{IN}, \forall j, k \in A, e \in E, d \in D, t \in T \quad (14)$$

$$\sum_{t' \in T : t' < t + c_{Tj}^{MIN}, t' > t + c_{Tj}^{MAX}} w_{kjedt'}^{OUT} = q_{kjedt}^{OUT}, \forall j, k \in A, e \in E, d \in D, t \in T \quad (15)$$

As restrições (12) a (15) referem-se aos passageiros à espera nos aeroportos – as duas primeiras são relativas a passageiros de voos internos e as outras a passageiros que vêm ou vão para o exterior. A equação (12) define que o número de passageiros no itinerário jhk (ou seja, passageiros que viajam entre j e k através do hub h) com partida de h no período de tempo t é igual ao número de passageiros desse itinerário jhk que tendo aterrado em h vindos de j entre $[t - c_{Tj}^{MAX}, t - c_{Tj}^{MIN}]$ vão partir para k no período de tempo t (Figura 4). A equação (13) é análoga para os passageiros que chegam ao hub h . Equações semelhantes – (14) e (15) – são definidas para os passageiros à espera que viajam em itinerários que começam (14) ou terminam (15) em aeroportos externos à região. Através deste conjunto de restrições fica definido o tempo de espera para cada passageiro de ligação, que é essencial para saber o custo desse tempo para a totalidade

da rede.

As restrições (16) e (17) dizem respeito às obrigações de serviço público: as primeiras estipulam um limite mínimo para o número de voos directos em cada ligação jk durante o período de operações (ou outro limite que seja estipulado pelas regras de serviço público) e as segundas definem o número mínimo de lugares disponíveis.

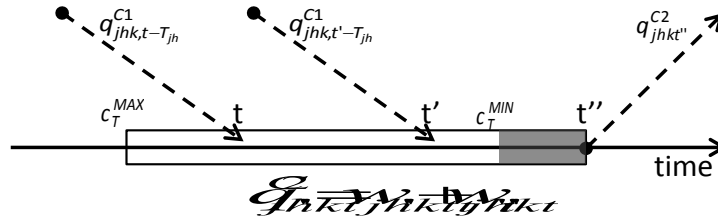


Figura 3: Relação entre passageiros de ligação e em espera num aeroporto intermédio

$$\sum_{f \in F} \sum_{d \in D} \sum_{t \in T} x_{kjfdt} \geq X_{jk}^{MIN}, \forall j, k \in A \quad (16)$$

$$\sum_{f \in F} \sum_{d \in D} \sum_{t \in T} x_{kjfdt} \times S_{Vf} \geq S_{jk}^{MIN}, \forall j, k \in A \quad (17)$$

3. APLICAÇÃO AOS AÇORES

O modelo de otimização descrito na secção anterior foi aplicado à rede de transporte aéreo dos Açores. Esta rede é actualmente operada pela companhia aérea SATA em regime de serviço público subsidiado pelo Governo Regional dos Açores. A rede dos Açores engloba nove aeroportos (um em cada ilha) dos quais quatro têm ligações regulares para o exterior da região (Figura 4). O maior aeroporto está localizado na capital regional – Ponta Delgada (PDL). Este aeroporto é uma das bases da SATA, havendo uma outra localizada na Ilha Terceira (TER).

Para garantir o serviço público, o Governo Regional dos Açores definiu diversos aspectos que têm de ser garantidos pela companhia que presta os serviços. Entre eles destacam-se: o número mínimo de voos directos entre as ilhas do arquipélago; o número mínimo de lugares a oferecer nas várias ligações; o dia dos voos para as ligações sem obrigação de voos diários; e as tarifas a aplicar aos residentes no arquipélago.

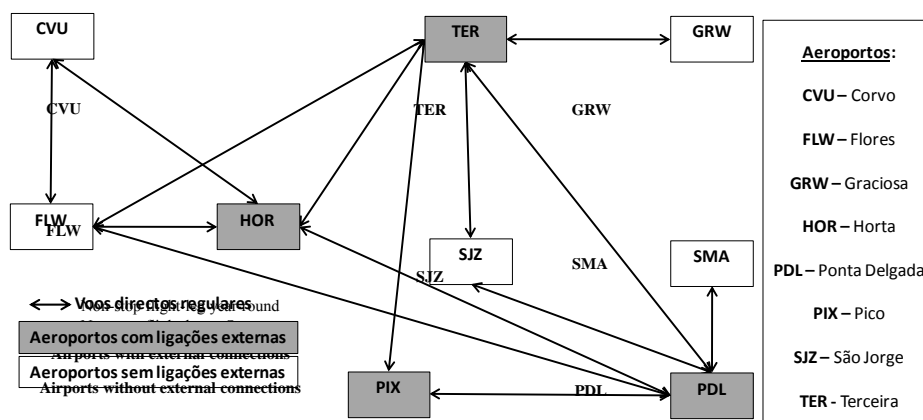


Figura 4: Ligações directas na rede interna dos Açores

O modelo foi usado para definir o horário dos voos e o tipo de aeronaves a atribuir a cada voo de forma a minimizar os custos totais da rede. Os resultados foram

comparados com os correspondentes à rede actual. Os indicadores utilizados nas comparações foram os seguintes: custos (totais, de veículo e em tempo), tempo de espera médio e máximo, número de voos e lugares disponíveis por ligação e *load factor* (total e por ligação).

Para resolver o modelo utilizou-se um computador com processador Quad Core de 4 GB de memória RAM e o software XPRESS com a versão de optimizador 22.01.04 (FICO, 2011). A aplicação aos Açores envolveu à partida mais de 80 mil variáveis inteiras, mas foi efectuado um pré-processamento pelos autores que diminuiu aquele número para cerca de 10 mil. Mesmo assim, o tempo necessário para correr o modelo foi de 103.5 minutos.

Seguidamente, em subsecções separadas, são descritos os dados usados para correr a aplicação, e apresentados e comentados os principais resultados obtidos.

3.1. Dados

Os dados necessários para correr o modelo são os seguintes: número mínimo de voos e de lugares em ligações directas, tempo de viagem para cada ligação direta, procura O/D, frota existente, custos de operação para cada ligação por tipo de aeronave e valor do tempo. A aplicação foi feita com base em dados de Julho de 2009.

O número mínimo de voos e lugares e o número actual de voos são apresentados na Tabela 2. O número total de voos por semana é 141, ou seja, mais 10% do que o mínimo requerido que é 128. A ligação com mais voos é PDL-TER com 31 voos directos, mais 5 do que o mínimo. O aeroporto com menos movimentos semanais é CVU (Corvo) – apenas 10. O tempo de viagem em minutos e a distância entre as ilhas constam também da Tabela 1.

Tabela 1: Obrigações de serviço público (voos e lugares), voos actuais, tempo de viagem e distância para cada ligação direta

Obrigações de serviço público, voos actuais, tempo voo e distância por ligação							
Ligação directa		Obrigações Serviço Público			Voos Actuais	Tempo Voo (min)	Distância (km)
		Voos	Lugares	Lugares/Voo			
PDL	SMA	14	1680	60.0	14	40	170
PDL	TER	26	3070	59.0	31	50	276
PDL	HOR	17	1960	57.6	17	50	246
PDL	PIX	9	1000	55.6	9	60	246
PDL	SJZ	6	670	55.8	7	90	511
PDL	FLW	4	380	47.5	7	30	102
TER	GRW	8	910	56.9	10	40	124
TER	SJZ	9	1040	57.8	9	40	96
TER	PIX	7	890	63.6	7	30	93
TER	HOR	14	1680	60.0	14	60	352
TER	FLW	4	380	47.5	4	30	81
HOR	FLW	5	480	48.0	7	50	246
HOR	CVU	3	60	10.0	3	50	257
CVU	FLW	2	40	10.0	2	10	24

O número total de passageiros transportados dentro dos Açores em Julho de 2009 foi de 51578 (EUROSTAT, 2009). A procura para cada par OD foi estimada tendo em consideração o número de passageiros processados (chegadas e partidas) em cada

aeroporto, a procura por ligação directa, a população de cada ilha e a distância entre cada ilha. Uma vez que queremos otimizar a rede para um dia de procura média consideramos uma matriz de procura simétrica (Tabela 2).

A frota de que a SATA dispõe é constituída por seis aeronaves – dois DHC-8-200 (DH2) e quatro DHC-8-400 (DH4) da série Dash 8 da Bombardier (Tabela 3). Os custos de operação destas aeronaves foram definidos a partir dos valores de referência da EUROCONTROL para a operação de aeronaves até 100 lugares (EUROCONTROL, 2009). Foi assumido que o custo de ter uma aeronave fora das bases da companhia (PDL e TER) é equivalente a 2/3 do custo de operação – custos de operação menos combustível.

O valor base usado para o tempo foi de 10 €/hora/pax para todos os passageiros. O valor do tempo em voo foi estimado como sendo 75% do valor base.

Tabela 2: Procura semanal por origem-destino (Julho 2009)

Procura semanal por O/D (Julho 2009)									
O/D	PDL	TER	HOR	PIX	SJZ	FLW	GRW	SMA	CVU
PDL	0	1443	790	357	304	335	198	381	25
TER	1443	0	393	178	258	160	168	102	12
HOR	790	393	0	93	79	155	52	56	12
PIX	357	178	93	0	36	40	24	26	3
SJZ	304	258	79	36	0	34	20	22	3
FLW	335	160	155	40	34	0	22	24	10
GRW	198	168	52	24	20	22	0	14	2
SMA	381	102	56	26	22	24	14	0	2
CVU	25	12	12	3	3	10	2	2	0

Tabela 3: Características da frota existente

Características da Frota			
Aeronaves	Número	Lugares	Custo BH (€)
DH2	2	37	1363
DH4	4	80	2156

3.2. Resultados

Nesta subsecção são apresentados e comentados os resultados principais obtidos através do modelo para um dia de operação (usou-se a segunda-feira como referência).

Usando o modelo com a rede actual – voos existentes – os custos totais são de 84351 € para os 42 voos e 2801 lugares oferecidos (*load factor* médio de 71.5%). A percentagem de passageiros que voam em itinerários directos é de 80% (1338 em 1671 passageiros) e o tempo médio de espera dos restantes passageiros é de 217 minutos (o tempo máximo de espera é de 540 minutos e ocorre no itinerário PIX- TER-HOR). Todas as seis aeronaves de que a SATA dispõe são necessárias para operar a rede actual.

A rede óptima é alcançada usando apenas 5 aeronaves (2 DH2 e 3 DH4), ou seja menos uma que actualmente, ao que corresponde um custo total de 62441.5 € (- 25.97%). O número de voos aumenta para 53 e os lugares disponíveis aumentam para 3294. A percentagem de passageiros directos é de quase 84% e o tempo médio de espera baixa para 112 minutos (o tempo máximo de espera é de 360 minutos e ocorre no itinerário

FLW- TER- HOR).

Para a companhia aérea que opera o sistema, as alterações situam-se em dois planos: primeiro, os custos com a operação dos voos aumentam 19% como reflexo de haver mais 11 voos; segundo, os custos com o estacionamento de aeronaves fora da base diminuem 96% (913 €). Na globalidade, os custos para a companhia diminuem 28% (de 60811 € para 44101 €)

Para os passageiros há também melhorias assinaláveis. O tempo de espera total é reduzido de 60870 minutos para 30090 minutos, decrescendo também a espera máxima e a espera média (Figura 6). Para além disso, a percentagem de passageiros em itinerários directos aumenta em 3% e o número de voos também aumenta, o que significa um melhor nível de serviço.

Analisando os resultados por aeroporto (ou ilha) e por O/D verifica-se que os ganhos estão bem distribuídos. O número de voos aumenta para os aeroportos de PDL, TER, SJZ, FLW e SMA. Os restantes 4 aeroportos mantêm o número de voos que existem na rede actual. A frequência de dez ligações directas aumenta em um voo e a da ligação TER-PDL, que já é a mais densa, aumenta em dois voos. Todas as outras ligações directas mantêm a frequência actual. Uma situação idêntica acontece para o número de lugares disponíveis por ligação. O tempo de espera diminui substancialmente na maioria das ligações (Figura 7), aumentando apenas em seis casos (TER- HOR, HOR-PDL, PIX-SJZ, PIX- SMA, FLW- HOR, GRW- HOR).

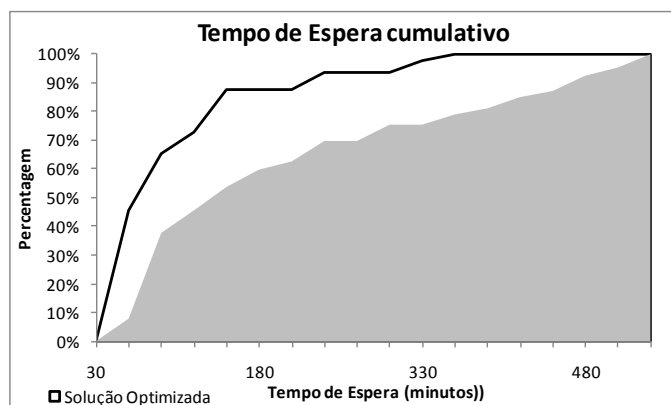


Figura 6: Comparação do tempo de espera entre a situação actual e solução otimizada

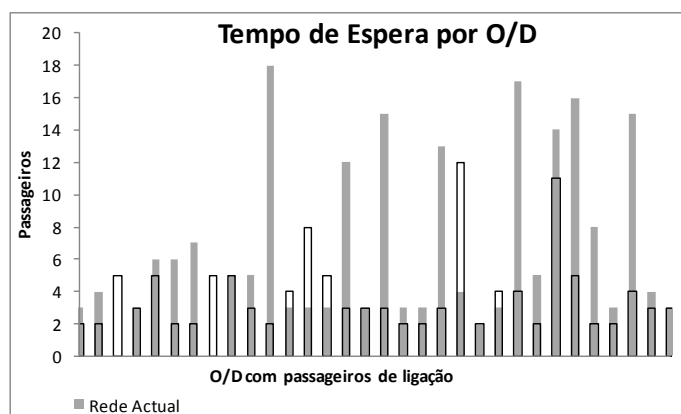


Figura 7: Tempo de espera por O/D para a situação actual e a solução otimizada

4. CONCLUSÃO

Este artigo apresenta um modelo integrado de gestão de frotas e construção de horários concebido para ser aplicado em redes de transporte aéreo operadas em regime de serviço público. O modelo tem simultaneamente em consideração a perspectiva da companhia aérea que opera o sistema e a perspectiva dos passageiros. Neste sentido, foram considerados na função-objetivo os custos de operação da companhia – custo de voar entre aeroportos e custo de estacionar aviões fora das bases da companhia aérea – e os custos do tempo para os passageiros – custo do tempo a bordo do avião e custo do tempo de espera em aeroportos intermédios.

A aplicação feita para a rede dos Açores – que é totalmente operada em regime de serviço público – mostra a utilidade prática do modelo. Apesar de algumas simplificações efectuadas, os resultados indicam inequivocamente que é possível reduzir os custos para a companhia aérea que opera a rede e para os passageiros que dela se servem. Mais do que isso, a frequência de voos pode ser aumentada e a procura satisfeita usando apenas cinco aeronaves em vez das actuais seis. Esta redução no número de aeronaves permite poupanças muito significativas para a companhia aérea – como é visível nos resultados obtidos.

Em trabalhos futuros tentaremos ultrapassar algumas das simplificações do modelo e, nomeadamente, o facto de não termos considerado os custos de operação dos aeroportos. Para isso, pretendemos desenvolver uma função que relacione aqueles custos com a duração do período em que, diariamente, os aeroportos têm de estar abertos. Mas o mais importante é mesmo conseguir diminuir o tempo de cálculo necessário para resolver o modelo através do recurso a métodos especializados, exactos ou heurísticos, pois de outro modo, dificilmente será possível trabalhar com redes regionais como as dos EUA ou da Noruega.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem os valiosos comentários dos Professores Cynthia Barnhart e Amedeo Odoni (MIT) no desenvolvimento desta investigação e o apoio financeiro dado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (Projecto AirNets integrado no Programa MIT-Portugal e bolsa de doutoramento SFRH/BD/43060/2008).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abara, J. (1989) Applying Integer Linear-Programming to the Fleet Assignment Problem. *Interfaces* 19(4), 20-28.
- Barnhart, C., Kniker, T.S. e Lohatepanont, M. (2002) Itinerary-Based Airline Fleet Assignment. *Transportation Science* 36(2), 199-217.
- Barnhart, C. e Kim, D. (2005) Flight Schedule Design for a Charter Airline. *Computers e Operations Research* 34(6), 1516-1531.
- Berge, M.E. e Hopperstad, C.A. (1993) Demand Driven Dispatch: a Method for Dynamic Capacity Assignment, Models and Algorithms. *Operations Research* 41(1), 153-168.
- Braathen, S. (2011) *Air Transport Services in Remote Regions*. International Transport Forum Discussion Paper 2011-13, OECD, Paris, France.
- Commission of the European Communities (1992b) *Regulation No. 2408/92 on Access for Community Air Carriers to Intra-Community Air Routes*, Commission of the European Communities, Brussels.
- Erdmann, A., Nolte, A., Noltemeier, A. e Schrader, R. (2001) Modeling and Solving an Airline Schedule Generation Problem. *Annals of Operations Research* 107(1-4), 117-142.
- EUROCONTROL (2009) *Standard Inputs for EUROCONTROL Cost Benefit Analyses*, 4th Edition, Brussels, Belgium.
- FICO, 2011. *Getting Started with Xpress – Release 7*. Fair Isaac Corporation – Xpress Team, Leamington Spa, UK.

- Graham, B. (2003) Air Transport and Economic Development in Remoter Regions. *Presentation at the 3rd Forum on Air Transport in Remoter Regions*, Cork, Ireland.
- Hane, C.A., Barnhart, C., Johnson, E.L., Marsten, R.E., Nemhauser, G.L. e Sigismondi, G. (1995) The Fleet Assignment Problem: Solving a Large-Scale Integer-Program. *Mathematical Programming* 70(2), 211-232.
- Lohatepanont, M. e Barnhart, C. (2004) Airline Schedule Planning: Integrated Models and Algorithms for Schedule Design and Fleet Assignment. *Transportation Science* 38(1), 19-32.
- Metrass-Mendes, A. e De Neufville, R. (2010). Air Transport Policy for Small Communities: Lessons from the U.S. Experience. *Proceedings of the 14th World Conference of the Air Transport Research Society* (Oporto, Portugal), CD-ROM.
- Reynolds-Feighan, A. (1995) European and American Approaches to Air Transport Liberalization: Some Implications for Small Communities. *Transportation Research Part A* 29(6), 467-483.
- Santana, I. (2009) Do Public Service Obligations Hamper the Cost Competitiveness of Regional Airlines?. *Journal of Air Transport Management* 15(6), 344-349.
- Swan, W. (2002) Airline Demand Distributions: Passenger Revenue Management and Spill. *Transportation Research Part E* 38(3-4), 253-263.
- Williams, G. e Pagliari, R. (2004) A Comparative Analysis of the Application and Use of Public Service Obligations in Air Transport Within the EU. *Transport Policy* 11(1), 55-66.
- Yan, S., Tang, C.-H. e Fu, T.-C. (2008) An Airline Scheduling Model and Solution Algorithms under Stochastic Demands. *European Journal of Operational Research* 190(1), 22-39.