



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

1º Workshop da APDR
O Impacto dos Aeroportos no Desenvolvimento Regional
Lisboa, Portugal
28 de Novembro de 2008

A Expansão de Redes de Aeroportos: Modelo Básico

António P. Antunes
Miguel G. Santos

1º Workshop da APDR – O Impacto dos Aeroportos no Desenvolvimento Regional
Lisboa, Portugal / 28 de Novembro de 2008

A Expansão de Redes de Aeroportos: Modelo Básico, 1

Introdução [1]

1. O tema deste workshop é “o impacte dos aeroportos no desenvolvimento regional”. O tema desta apresentação tem sobretudo a ver com o contrário, ou seja, com “o impacte do desenvolvimento regional nos aeroportos”.
2. Com efeito, está em causa o seguinte problema: **determinar o modo como deve evoluir uma rede de aeroportos no longo prazo para dar resposta da melhor forma possível ao aumento esperado da procura de transporte aéreo** (aumento esse que depende do ritmo de desenvolvimento esperado para as cidades/regiões do país ou conjunto de países em análise).
3. O problema é tratado na **óptica da autoridade do transporte aéreo** – que é apenas uma das muitas entidades envolvidas nos processos de expansão de (redes) de aeroportos.

FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Introdução [2]

4. O tema da **expansão/construção de aeroportos está muito presente na literatura, mas rarissimamente tem sido tratado numa perspectiva de rede** – habitualmente são considerados aeroportos individuais, e as decisões de expansão/construção são equacionadas através de análise custos-benefícios ou análise multi-critérios.
5. Os raros artigos em que prevalece uma perspectiva de rede são dedicados à **definição de princípios gerais, teóricos, aplicáveis à expansão de redes de aeroportos, e não à resolução de problemas concretos** – como aqueles que o modelo de optimização apresentado seguidamente, pretende abordar.

Introdução [3]

6. O trabalho de desenvolvimento do modelo – que é ainda um **modelo básico** – tem decorrido no âmbito de um dos projectos de investigação integrados no **Programa MIT-Portugal**, área de Transportes – o **Projecto AirNets: Implications of Congestion for the Configuration of Airport Networks and Airline Networks**.



Sumário

1. Introdução
2. Ingredientes do modelo
3. Formulação do modelo
4. Exemplos de aplicação
5. Limitações do modelo
6. Conclusão

Ingredientes do Modelo [1]

1. O âmbito de aplicação do modelo é um país ou conjunto de países com N cidades/regiões (o conjunto de cidades é $\mathbf{N} = \{1, 2, \dots, N\}$). As cidades podem ter aeroporto(s) ou não. A distância esférica entre duas cidades, j e k , é d_{jk} .
2. A capacidade inicial do(s) aeroporto(s) da cidade k é s_k^0 ($s_k^0 = 0$ significa que a cidade k não tem aeroporto).
3. A procura de viagens entre as cidades j e k , t_{jk} , é uma função (linear) decrescente do montante pago pelas viagens, x_{Ajk} ; isto é,

$$t_{jk} = q_{jk} - \alpha x_{Ajk}, \forall j, k \in N \quad q_{jk} = \gamma P_j P_k \times \min \left\{ \frac{d_{Ljk} - d_{A_{\min}}}{d_{L_{\max}} - d_{A_{\min}}}, 1 \right\}, \forall j, k \in N$$

em que P_j é a “massa” (população, etc.) da cidade j , $d_{L_{\max}}$ ($d_{A_{\min}}$) é comprimento máximo (mínimo) de uma viagem por terra (ar), e α e γ são parâmetros de calibração estatística.

Ingredientes do Modelo [2]

4. As ligações entre cidades podem ser directas e/ou indirectas, através de um (e um só) hub. Para serem directas têm de reunir um dado número mínimo de passageiros, u_{min} ← economias de escala
5. Os custos de transporte (por passageiro) têm uma componente fixa para a paragem num hub (caso exista) e uma componente variável em função da distância.

$$c_{jk} = \sigma + \theta(d_{jk}), \forall j, k \in N$$

Ingredientes do Modelo [3]

6. A capacidade do aeroporto da cidade k pode ser aumentada através de L_k acções (o conjunto de acções é $L_k = \{1, 2, \dots, L_k\}$). Para cidades sem aeroporto, estas acções correspondem à construção de um novo aeroporto. A aplicação da acção l na cidade k aumenta a capacidade em g_{kl} e custa e_{kl} .
7. Um aeroporto apenas será construído/expandido se o tráfego nesse aeroporto for, no mínimo, uma dada fracção, f_{min} , da sua capacidade. ← economias de escala
9. O orçamento para a expansão da rede de aeroportos é b .
10. O objectivo é maximizar o número total de viagens realizadas na região (“maximizar a procura coberta”)

Formulação do Modelo [1]

Variáveis de decisão

s_j : capacidade do aeroporto j

t_{jk} : número de viagens entre os aeroportos j e k (matriz O/D)

u_{jk} : número de viagens directas entre os aeroportos j e k

v_{jnk} : número de viagens entre os aeroportos j e k passando pelo hub h

X_{jnk} : custo agregado para os passageiros das viagens entre os aeroportos j e k passando pelo hub h

$w_{jk} = 1$ se existirem viagens directas entre os aeroportos j e k

$z_j = 1$ se a acção de expansão / é aplicada ao aeroporto j

Formulação do Modelo [2]

$\max T = \sum_{j \in N} \sum_{k \in N} t_{jk}$ Maximizar o número total de viagens

$$t_{jk} \leq q_{jk} - \gamma \sum_{h \in N} x_{jhk}, \forall j, k \in N, j \neq k$$

A procura de viagens entre aeroportos é uma função (linear) negativa dos custos que os passageiros pagam para viajar

$$t_{jk} = \sum_{h \in N} v_{jhk}, \forall j, k \in N, j \neq k$$

As viagens entre dois aeroportos podem ser realizadas de forma directa e/ou indirecta, através de um hub

$$x_{jhk} = c_{jhk} v_{jhk}, \forall j, h, k \in N, j \neq h \neq k$$

O montante pago pelos passageiros é, no caso de viagens indirectas, igual aos custos das companhias, mas pode ser superior no caso de viagens indirectas havendo racionamento da procura por falta de capacidade dos aeroportos)

$$x_{jhk} \geq c_{jhk} v_{jhk}, \forall j, h, k \in N, j = h \vee h = k$$

A percentagem de viagens directas entre aeroportos é superior a um dado valor mínimo (zero no caso dos menores aeroportos)

$$v_{jhk} \geq \pi_{jk} t_{jk}, \forall j, h, k \in N, j = h \vee h = k$$

$$u_{jk} = \sum_{l \in N} v_{ljk} + \sum_{l \in N} v_{jkl}, \forall j, k \in N, j \neq k$$

O número total de passageiros em cada ligação é calculado com base nas viagens de todas as origens para todos os destinos em que aligação se inclui

$$u_{\min} w_{jk} \leq u_{jk}, \forall j, k \in N, j \neq k$$

Uma ligação só existe se corresponder a um dado número mínimo de passageiros

Formulação do Modelo [3]

$s_j = s_j^0 + \sum_{l \in L_k} g_{jl} z_{jl}, \forall j \in N$	A capacidade de cada aeroporto é dada pela soma da sua capacidade inicial com o incremento de capacidade devido à acção de expansão aplicada
$\sum_{l \in L_k} g_{kl} z_{kl} \leq 1, \forall k \in N$	No máximo, é aplicada uma acção de expansão em cada aeroporto
$s_k \geq \sum_{j \in N} u_{jk}, \forall j \in N$	A capacidade de cada aeroporto deve acomodar o movimento no aeroporto (partidas/chegadas)
$\sum_{j \in N} u_{jk} \geq f_{\min} s_k, \forall j \in N$	O movimento em cada aeroporto deve ser, no mínimo, igual a uma fracção da sua capacidade (e.g. 50%)
$\sum_{k \in K} \sum_{l \in L_k} e_{kl} z_{kl} \leq b$	O orçamento não pode ser excedido
$t_{jj} = 0, v_{jih} = 0, u_{ij} = 0, \forall j, h \in N$	As viagens têm aeroportos de origem e destino diferentes (a ida e a volta são viagens diferentes)
$v_{jhk} = v_{khj}, \forall j, h, k \in N$	A solução é simétrica

Formulação do Modelo [4]

Em suma:

Um **modelo de optimização combinatoria** linear bastante complexo, envolvendo elementos de quatro tipos de modelos bastante estudados na literatura da optimização:

- (a) Modelos de expansão de capacidade
- (b) Modelos de localização de equipamentos colectivos (facility location)
- (c) Modelos de localização de hubs
- (d) Modelos de planeamento de redes

Exemplo de Aplicação [1]

1. Número de cidades: 10
2. Localização das cidades: distribuídas aleatoriamente numa região de forma quadrangular com 2000 km de lado
3. População dos centros: Lei de Zipf, tendo o primeiro centro uma população máxima compreendida entre 2,5 e 5 milhões de habitantes
4. Parâmetros da função procura: $\alpha = 1,0$ $\gamma = 0,0125$
6. Custo variável de viagem : $\theta = 1,0$ u.m./km/pax
7. Custo fixo de paragem: $\sigma = 1000$ u.m./pax
8. Número mínimo de viagens entre aeroportos: $u_{min} = 500$ pax/dia
9. Percentagem mínima de viagens directas nas ligações mais importantes (5%): $\pi = 50\%$
10. Fracção mínima da capacidade usada: $f_{min} = 50\%$

Exemplo de Aplicação [2]

11. Tipos de aeroportos e capacidades

Tipos de aeroporto	Capacidade (10^3 pax/day)
1 - Pista única	90
2 - Duas pistas paralelas próximas	135
3 - Duas pistas paralelas mediamente espaçadas	160
4 - Duas pistas paralelas independentes	180
5 - Três pistas (2 próximas+1)	225
6 - quatro pistas (2 pares de pistas paralelas próximas)	270

12. Custo das acções de expansão

Do tipo de aeroporto	Para o tipo de aeroporto					
	1	2	3	4	5	6
0	8	10	12	14	16	18
1	-	6	8	9	12	14
2		-	5	6	9	11
3			-	4	7	9
4				-	6	8
5					-	5

Resultados do Modelo

Xpress-MP

Limitações do Modelo

1. O objectivo, embora clássico, não é tão relevante do ponto de vista económico como o benefício dos utilizadores (**excedente dos consumidores**). Mas a adopção deste objectivo tornaria o modelo não-linear.
2. A **procura das cidades sem aeroporto não é tida em consideração** (para sê-lo, o modelo torna-se claramente mais complexo embora continuando a ser linear).
3. Os **custos são lineares no número de passageiros** (embora só acima de um dado número mínimo de passageiros).
4. As **taxas de aeroporto** são (podem ser) incluídas apenas como **parâmetros**. A sua inclusão como variáveis de decisão tornaria o modelo não-linear.
5. O modelo é muito difícil de resolver em termos exactos (mesmo assim)

Conclusão

1. O modelo é um passo importante, mas, na forma em que está, não chega para se analisar devidamente a expansão de redes de aeroportos (está em desenvolvimento uma aplicação para a Península Ibérica em que o modelo será testado em contexto real)
2. Os principais melhoramentos de que o modelo necessita tornam-o não-linear e só possível de resolver por métodos heurísticos, não exactos – cujo trabalho de desenvolvimento foi iniciado recentemente.
3. Para além dos melhoramentos já apontados existem vários outros relevantes, por exemplo, a consideração de dinâmica e de incerteza. E ainda: o impacte dos aeroportos no desenvolvimento regional (e na procura de viagens...)