

CÁLCULO DE UNA COTA SUPERIOR PARA EL PROBLEMA DE PLANIFICACIÓN DE CONFIGURACIONES DE LAS PISTAS DE UN AEROPUERTO

Cabezas Xavier¹, Delgado Erwin², Noboa Dalton³

Resumen: Uno de los problemas que enfrentan los operadores aéreos es establecer la secuencia de configuración de las pistas del aeropuerto en un horizonte de planificación. La secuencia de configuración de las pistas en el horizonte de planificación incide directamente en la capacidad de los aeropuertos para atender tanto llegadas como salidas de aviones. Otro aspecto a considerar es que algunas configuraciones no están disponibles en determinados periodos en la mayoría de los casos por cuestiones meteorológicas. En el presente trabajo se presenta un método para el cálculo de una cota superior para el problema de planificación de configuraciones de un aeropuerto en un horizonte de planificación.

Palabras claves: heurística, planificación, aeropuertos

Abstract: One of the operational problems faced by aircraft operators is to establish the sequence of setting the airport runways in a planning horizon. The configuration of the runways in the planning horizon directly affects the capacity of airports to meet both arrivals and departures of aircraft. Another aspect to consider is that some configurations are not available in certain periods in most cases due to weather issues. In the present work, a method for calculating an upper bound for the planning problem configurations of an airport in a planning horizon is presented.

Keywords: heuristic, planning, runway.

Recibido: Marzo 2016.

Aceptado: Abril 2016.

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas que enfrentan los operadores aéreos es establecer la secuencia de configuración de las pistas del aeropuerto en un horizonte de planificación. La secuencia de configuración de las pistas en el horizonte de planificación incide directamente en la capacidad de los aeropuertos para atender tanto llegadas como salidas de aviones. Otro aspecto a considerar es que algunas configuraciones no están disponibles en determinados periodos de tiempo en la mayoría de los casos por cuestiones meteorológicas.

Así, visto de una manera integral, este problema incorpora establecer no sólo la secuencia de configuración de las pistas sino administrar las mismas, es decir determinar el número de llegadas y partidas en un periodo específico de tiempo con el objeto de minimizar los costos de operación del aeropuerto debido a vuelos postergados sujeto a las restricciones de capacidad de los aeropuertos.

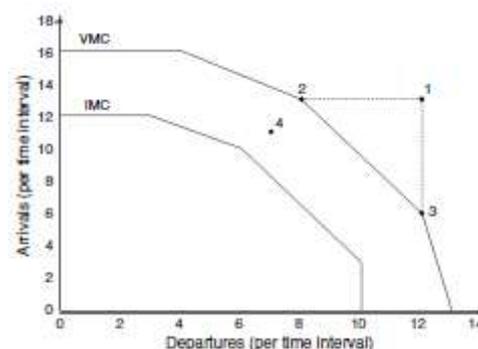
Generalmente, la capacidad de los aeropuertos que operan en una configuración dada se representa a través de la “runway configuration capacity envelope” (RCCE) (Gilgo 1993, 1997).

Una RCCE es una región convexa que permite establecer los niveles de operación, tanto en arribos como en salidas de un aeropuerto, bajo ciertas configuraciones y otras condiciones operativas, en específicos periodos. Por ejemplo, en la figura 1, se muestran dos RCCE para diversas condiciones operativas. Así, la VMC (“visual meteorological conditions”) muestra la capacidad del aeropuerto bajo condiciones visuales de operación, mientras que la IMC (“instrument meteorological conditions”) muestra la capacidad del aeropuerto bajo condiciones instrumentales de operación.

Por otra parte, el punto 4 muestra que sólo se puede operar en VMC y no en IMC. En cambio, el punto 1 no es operativo bajo ninguna configuración.

Figura 1:

RCCE bajo condiciones VMC y IMC. Fuente: 3



¹Xavier Cabezas, Departamento de Matemáticas, ESPOL. (e-mail: joxacabe@espol.edu.ec)

²Delgado Erwin, Departamento de Matemáticas, ESPOL. (e-mail: edelgado@espol.edu.ec)

³Noboa Dalton, Departamento de Matemáticas, ESPOL. (e-mail: dgnoboa@espol.edu.ec)

2. REVISIÓN DE LITERATURA

Esta problemática fue abordada parcialmente por Gilbo [1], donde propone un MIP (“mixed integer problem”) para determinar el balance entre arribos y salidas con el objetivo de minimizar los costos totales por atrasos de vuelos, sujeto a una secuencia de configuraciones del aeropuerto conocido a priori. Sin embargo, es conocido que optimizar procesos locales no conllevan necesariamente a una optimización global del problema.

En este contexto, Dimitris Bertsimas et al [3], propone un MIP que aborda esta problemática de una manera integral incorporando una serie de variantes al modelo básico. Así, inicialmente considera que los tiempos de cambios entre configuraciones es de un periodo de tiempo, luego de lo cual incorpora la posibilidad de cambiar la duración de los cambios de configuración bajo un enfoque de discretización de los periodos. Asimismo, establece que si el tiempo de intercambios entre configuraciones es igual a un periodo, existen un máximo de $T(3 + J + JK + 4K)$ restricciones, $T(2 + K)$ variables enteras y $4KT$ variables continuas siendo T el número de periodos, J el número de partes lineales de las curvas *RCCE* y K el número de configuraciones.

Por último, aborda el hecho de que la planificación de la demanda en un aeropuerto no solo afecta al mismo, sino a los aeropuertos cercanos ya que, dependiendo de las condiciones de operación de los aeropuertos, la demanda en ciertos periodos puede ser derivada a otros aeropuertos. Por lo antes expuesto, en el presente trabajo se pretende determinar una cota superior para el problema descrito inicialmente, con el objeto de que en futuras investigaciones sea utilizado en la definición de criterio de parada de algún otro método de solución.

3. FORMULACIÓN MATEMÁTICA

Dimitris Bertsimas et al [3], presenta un enfoque basado en un modelo de programación entero mixta que permite encontrar la solución óptima del problema definido anteriormente. Para el efecto, se han definido las siguientes componentes:

3.1. Conjuntos y parámetros

$T = \{1, 2, 3, \dots\}$: Conjunto de periodos.

K_t : Conjunto de configuraciones disponibles en el periodo t .

J_k^t : Conjunto de secciones lineales de la más alejada *RCCE* disponible para la configuración k en el periodo t .

a_t : Número de arribos planificados en el periodo t .

d_t : Número de salidas planificadas en el periodo t .

c_t : Costo por unidad por avión con retraso en el arribo en el periodo t .

q_t : Costo por unidad por avión con retraso en el despegue en el periodo t

3.2. Variables

Con el objeto de formular un modelo de programación entero mixta, se procede a definir las siguientes variables.

$$z_{kt} = \begin{cases} 1, & \text{si el aeropuerto opera en la} \\ & \text{configuración } k \text{ en el tiempo } t \\ 0, & \text{sino} \end{cases}$$

y_{kt} : Número de arribos atendidos si el aeropuerto opera en la configuración k en el tiempo t .

x_{kt} : Número de salidas atendidos si el aeropuerto opera en la configuración k en el tiempo t .

u_t : Número de arribos no atendidos en el tiempo t .

v_t : Número de salidas no atendidas en el tiempo t .

3.3. Formulación matemática

$$\min \sum_{t \in T} (c_t u_t + q_t v_t) \quad (1)$$

s.a

$$u_t - u_{t-1} + \sum_{k \in K_t} y_{kt} = a_t, \quad \forall t \in T \quad (2)$$

$$v_t - v_{t-1} + \sum_{k \in K_t} x_{kt} = d_t, \quad \forall t \in T \quad (3)$$

$$\gamma_{jk} y_{kt} + \beta_{jk} x_{kt} + \alpha_{jk} z_{kt} \leq 0, \quad \forall j \in J_k^t \quad \forall k \in K_t \quad \forall t \in T \quad (4)$$

$$\sum_{k \in K_t} z_{kt} \leq 1, \quad \forall t \in T \quad (5)$$

$$\sum_{k' \in K_{t-1} \setminus \{k\}} z_{k't-1} + z_{kt} \leq 1, \quad \forall k \in K_t \quad \forall t \in T \setminus \{1\} \quad (6)$$

$$z_{kt} \in \{0, 1\} \quad \forall k \in K_t \quad \forall t \in T$$

$$(7)$$

$$u_t, v_t \in \mathbb{Z} \quad u_t \geq 0 \quad v_t \geq 0 \quad \forall t \in T$$

$$(8)$$

$$y_{kt} \geq 0, \forall k \in K_t \quad \forall t \in T$$

$$(9)$$

$$x_{kt} \geq 0, \forall k \in K_t \quad \forall t \in T$$

$$(10)$$

La restricción (1) representa la función objetivo, el cual es minimizar los costos totales por retrasos tanto en arribos como en salidas. La restricción (2) relaciona los niveles de arribos atendidos, los no atendidos y su respectiva demanda en cada periodo de tiempo. De manera similar, la restricción (3) relaciona los niveles de salidas atendidos, los no atendidos y su respectiva demanda en cada periodo de tiempo y para cada configuración disponible en ese periodo de tiempo. La restricción (4) garantiza que los niveles de demanda tanto de arribos y salidas satisfagan las condiciones de operación del aeropuerto. La restricción (5) garantiza que en cada periodo de tiempo a lo mucho una configuración esté operativa. La restricción (6) garantiza que en dos periodos consecutivos de tiempo no existan configuraciones distintas. Las restricciones (7), (8), (9), (10) se refieren a la naturaleza de las variables.

4. CÁLCULO DE COTA SUPERIOR

Con el objeto de obtener una cota superior al problema de planificación de las configuraciones de las pistas en un aeropuerto, se propone un algoritmo el cual se encuentra dividido en dos etapas.

4.1. Construcción de la secuencia de configuraciones.

Para la etapa 1, se procede a construir una secuencia de configuraciones en el horizonte de planificación, es decir, en esta primera etapa se planificará una configuración en cada periodo del horizonte de planificación.

Para el efecto, se procede a implementar un algoritmo glotón, el cual privilegia las configuraciones que se encuentran activas de manera continua en un mayor número de periodos. A breves rasgos el pseudocódigo de esta etapa está dado por los siguientes pasos:

Paso 1: Ordenar las configuraciones de mayor a menor número de periodos consecutivos en que las mismas son admisibles. Sea k el mayor número de

periodos consecutivos en que la configuración i es admisible

Paso 2: Asignar la configuración i a los primeros k periodos.

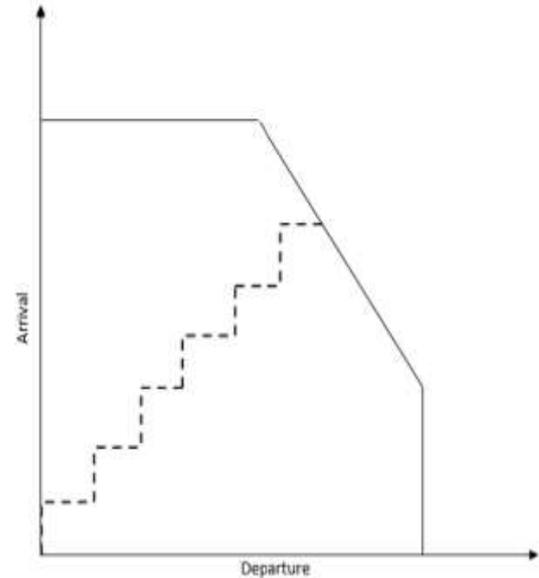
Paso 3: Incorporar la configuración nula al periodo $k + 1$ (es decir, en este periodo no se encuentra operativo el aeropuerto) debido a cambio de configuración. Si no todos los periodos tienen asignado alguna configuración, regresar al paso 1, caso contrario finalizar.

4.2. Asignación de requerimientos de arribos y salidas

En esta etapa, con base en la secuencia de configuraciones del horizonte de planificación, se procede a establecer los niveles de arribos y salidas en cada periodo, satisfaciendo que el punto de operación (arribos y salidas) satisfaga los niveles de operación del aeropuerto en una configuración dada.

Para el efecto, y dado que el costo de un arribo atrasado cuesta más que el de una salida atrasada, se realiza iterativamente un incremento en una unidad tanto los arribos como las salidas empezando por los arribos, tal como se muestra en la figura 2.

Figura 2:
Asignación de arribos y salidas en cada periodo



A breves rasgos el pseudocódigo de esta etapa está dado por los siguientes pasos:

Sean x_t el número de partidas en el tiempo t , y y_t el número de arribos en el tiempo t ,

Paso 1 Sean $t = 1, x_0 = 0, y_0 = 0$

Paso 2: Si $y_t < a_t$ y $(x_t, y_t) \in RCCE$, hacer:
 $y_t = y_{t-1} + 1$.

Paso 3: Si $x_t < b_t$ y $(x_t, y_t) \in RCCE$ $x_t = x_{t-1} + 1$

Paso 4: $t = t + 1$. Mientras que no todos los periodos tengan asignado los arribos y partidas entonces regresar al paso caso contrario finalizar.

5. RESULTADOS COMPUTACIONALES

El algoritmo propuesto ha sido ejecutado en un computador con características de procesador Intel Core 2 Duo 2.80 Ghz con 4GB de RAM.

En la tabla 1, se muestran los resultados, tanto de forma exacta así como las cotas superiores obtenidos a partir del algoritmo, al implementar diversas instancias en GAMS (para el modelo exacto) y en Mathematica 9.0 (para el algoritmo)

Instancia	Valor óptimo	Cota Superior	Desviación estándar	Tiempo Computacional (s)
1	4498	5618	123.2	0.00628
2	10134	12060	322.1	0.04446
3	15556	18822.76	342.1	0.05124

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con base en los resultados obtenidos, se puede evidenciar que el algoritmo propuesto, produce en promedio cotas superiores en alrededor del 20% del valor óptimo. Una posible mejora a esta propuesta es incorporando estructuras de memoria en el proceso de búsqueda local.

REFERENCIAS

- [1] Eugene P. Gilbo. Optimizing Airport Capacity Utilization in Air Traffic Flow Management Subject to Constraints at Arrival and Departure Fixes. *IEEE Transactions On Control Systems Technology*, Vol. 5, No. 5, September 1997
- [2] Michael Joseph Frankovich. Air Traffic Flow Management at Airports: A Unified Optimization Approach. Ph. D. thesis. (2012)
- [3] Dimitris Bertsimas, Michael Frankovich, Amedeo Odoni, (2011) Optimal Selection of Airport Runway Configurations. *Operations Research* 59(6):1407-1419.
- [4] Richard E. Rosenthal. *GAMS: A User's Guide*. GAMS Development Corporation, Washington, DC, USA. 2012
- [5] Paul R. Wellin, Richard J. Gaylord, Samuel N. Kamin. *An Introduction to Programming with Mathematica*. Third Edition. Cambridge University Press. 2005