

# UN MODELO SOBRE LA VIABILIDAD DEL DESARROLLO DE UN *HUB* EN EL AEROPUERTO DE BARCELONA

**César Trapote Barreira**

ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona y CENIT  
Universidad Politécnica de Cataluña  
Jordi Girona 1-3, edificio B1 – 08034 Barcelona (España)  
[cesar.trapote@upc.edu](mailto:cesar.trapote@upc.edu)

**Francesc Robusté Antón**

ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona y CENIT  
Universidad Politécnica de Cataluña  
Jordi Girona 1-3, edificio B1 – 08034 Barcelona (España)  
[f.robuste@upc.edu](mailto:f.robuste@upc.edu)

## RESUMEN

El artículo desarrolla una metodología general para evaluar el potencial que posee un aeropuerto para desarrollar en él una base de operaciones del tipo *hub* orientada al tráfico internacional, modelizando los condicionantes propios que impone un entorno aeroportuario competitivo. Se aplica al caso de Barcelona que está condicionado por la cercanía a otros aeropuertos *hub* de grandes aerolíneas.

El modelo se contrasta y de la aplicación se infiere que si bien es posible aumentar el porcentaje de conexiones del 12% al 20% en el aeropuerto de Barcelona, sus posibilidades de convertirse en un *hub* intercontinental son más limitadas que lo que sugieren las reivindicaciones políticas locales.

El modelo desarrollado revela que el crecimiento del aeropuerto de Barcelona debe empezar consolidando un conjunto de vuelos directos internacionales y comunitarios que favorecerán el posicionamiento estratégico de la infraestructura en el contexto aeroportuario europeo y consolidará una masa crítica que le permita en el futuro desarrollar una base de conexiones.

PALABRAS CLAVE: modelización, *hub*, aeropuerto.

## 1. INTRODUCCIÓN

El concepto de aeropuerto como un proveedor de infraestructuras ha quedado atrás y en la actualidad se entiende como una provisión de servicios que, contemplada como unidad de negocio, está orientada a la eficiencia y la rentabilidad (excepto por obligaciones de servicio público y garantía de derechos mínimos de accesibilidad territorial). Esta concepción de “negocio aeroportuario” ha venido acompañado de un análisis de sistema del aeropuerto como una terminal funcional de transporte intermodal y de los resultados de las economías de escala y la gestión óptima del sistema de transporte aéreo que ha definido una nueva jerarquía de nodos en la red que aparece con la configuración de estructuras *hub&spoke*.

Los aeropuertos que actúan consolidando los flujos de pasajeros son nodos privilegiados respecto a los demás y generan un valor añadido superior. Esto explica el gran interés de gestores e inversores en promocionar sus infraestructuras para convertirlas en la base de operaciones *hub* de grandes compañías, desencadenando una incipiente competitividad aeroportuaria que ha dinamizado el sector. Además, el rápido crecimiento del transporte aéreo satura los grandes *hubs* y favorece los procesos de descentralización, que son una respuesta flexible frente a las dificultades de ampliar las infraestructuras actuales.

Se presenta una propuesta metodológica que define un modelo que permite evaluar el potencial de desarrollo de un aeropuerto *hub*; por lo tanto, pretende resolver un problema de localización determinando los beneficios sobre los usuarios al activar una nueva infraestructura dedicada a las conexiones.

## 2. EL SISTEMA AEROPORTUARIO EUROPEO

El sistema aeroportuario europeo se caracteriza por ser un entorno altamente competitivo (Comisión Europea, 2002), sin embargo, el tráfico de pasajeros presenta una concentración en unos pocos países e infraestructuras destacadas motivada por la necesidad de las aerolíneas de aprovechar las economías de escala por eficiencia, a pesar del lastre distorsionador de la eficiencia logística que en este sentido pueden representar las aerolíneas de bandera (ineficiencias suavizadas por las alianzas mundiales del presente decenio).

Una clasificación de los países comunitarios relacionando su tráfico de pasajeros en aeropuertos con su producto interior bruto y su población demuestra que existen cinco países bien diferenciados del resto: Reino Unido, Alemania, España, Francia e Italia; son seis si se incluye Holanda cuyo aeropuerto principal es uno de los *hubs* más importantes de Europa. Este análisis en base a variables socioeconómicas permite identificar este grupo de países de características comparables que concentran en sus aeropuertos más del 70% del tráfico de pasajeros de la Unión Europea. Además, poseen las infraestructuras más importantes del sistema aeroportuario incluidos los *hubs* de primer nivel en la red: London-Heathrow (LHR), París-Charles de Gaulle (CDG), Frankfurt (FRA), Ámsterdam (AMS) y Madrid-Barajas (MAD).

La distribución de tráfico de pasajeros en los aeropuertos de la UE sigue la regla ABC, de manera que solo unos pocos aeropuertos vitales concentran la mayor parte de tráfico (60 aeropuertos o un 13,6% del total, concentran el 80% del tráfico) y muchos triviales concentran una parte minoritaria (380 aeropuertos concentran el 20% restante), tomando datos de Eurostat del año 2005. Esta situación ha desencadenado un agotamiento de la

capacidad de las principales infraestructuras (BCG, 2004), limitando su crecimiento (ACI, 2005) y provocando retrasos importantes en las aerolíneas que operan en dichos aeropuertos (AEA, 2003).

Por otra parte, se puede analizar la concentración del tráfico internacional tomando los países del grupo destacado y atendiendo a la distribución acumulada por aeropuertos (Fig. 1). Los cinco aeropuertos más importantes en tráfico total de pasajeros citados (LHR, CDG, FRA, AMS, MAD) son además los *hubs* de primer nivel de la UE y concentran más del 50% del tráfico internacional. Por tanto, es un hecho que existe centralidad operativa en todos los sistemas aeroportuarios presentados y es un efecto natural de la necesidad de las aerolíneas dominantes de concentrar su tráfico internacional para operar eficientemente aprovechando las economías de escala.

### 3. PROPUESTA METODOLÓGICA

A continuación se describe un modelo de localización de un *hub* con la inclusión de un mecanismo competitivo. Éste se basa en activar expediciones a determinados mercados y captar tráfico de conexión y/o recuperar tráfico que conecta actualmente en otros *hubs* mejorando el tiempo percibido de viaje por el usuario. Es destacable que la metodología propuesta no tiene por finalidad encontrar qué aeropuertos pueden ser *hubs*, o lo que es equivalente, no tiene por objeto convertirse en una herramienta para construir una red eficiente. Simplemente evalúa la viabilidad de promocionar a *hub* un aeropuerto que es introducido en el modelo de forma exógena, como ya hizo Hansen (1990).

La metodología tiene dos fases claramente diferenciadas. En la primera, se describe formalmente el problema, se plantean las hipótesis de resolución que son necesarias para simplificar el problema ya que es de cierta complejidad, se propone un tratamiento de los datos de partida necesarios para construir el modelo y, finalmente, se definen unas métricas de evaluación. En la segunda fase, se propone un método de resolución basado en heurísticas que permita localizar las nuevas expediciones.

#### 3.1. Formulación del problema

En primer lugar, debe seleccionarse un **intervalo temporal de estudio** (ITE), suficientemente representativo de la dinámica del sector aéreo. En este caso se toma como unidad de tiempo la semana, que se justifica porque en la práctica cualquier línea regular tiene como mínimo una expedición semanal. Este planteamiento obliga a que la evaluación global se deba llevar a cabo integrando los resultados de aplicar este método a las semanas de todo el año. Sin embargo, los perfiles anuales de pasajeros en un aeropuerto permiten establecer ciertos patrones que son beneficiosos para ordenar estos flujos.

De cara a simplificar la propuesta, todas las variables enunciadas que estén vinculadas a estacionalidad, por lo tanto, que dependen de qué semana se tome como unidad de estudio, van a tomarse en término promedio. Esta simplificación del problema no le quita valor a la metodología propuesta. De todas formas, el perfil de carga en pasajeros puede ser conocido para el aeropuerto y esto permitiría contrastar los resultados.

Sea un **conjunto de aeropuertos**  $P = \{p_1, \dots, p_n\}$  con una **matriz de flujos origen-destino**,  $\mathbf{M} = \{m_{ij}\}$  con  $i, j = 1, \dots, n$ , que explica las relaciones entre éstos en términos de pasajeros

totales en este intervalo de tiempo seleccionado. También, la **matriz de vuelos asociada**  $F = \{f_{ij}\}$ , y se podría deducir la **matriz de ocupación media**  $O$ . En el extremo, para simplificar este conjunto de datos se puede reducir la matriz a las relaciones significativas o concentrar determinados conjuntos de aeropuertos (por ejemplo, los de un país determinado) a un solo aeropuerto ficticio.

Entonces, la variable básica del estudio es el tiempo que se materializa en las relaciones entre aeropuertos como el tiempo necesario para realizar un salto (se conoce como salto el vuelo entre dos aeropuertos). La **matriz de tiempos**  $T = \{t_{ij}\}$  se puede obtener como el producto de una **velocidad ponderada** (debería ser una ponderación de la velocidad de cada aparato y el número de expediciones o pasajeros) que se toma en termino promedio como  $v$ , y la **distancia entre aeropuertos**. Ésta sí es diferente a la distancia entre dos puntos sobre el plano ya que se debe considerar la curvatura de la tierra (*Great Circle*), dando lugar a la matriz  $D = \{d_{ij}\}$ , de manera que se cumple la relación cinemática elemental  $t_{ij} = d_{ij}/v$ .

Entre estos aeropuertos existe un **grupo de hubs** que forman el subconjunto  $H \subseteq P$  tal que la dimensión  $|H| = m$ , con  $m \leq n$ . De ellos se conoce la **tasa de conexiones** sobre el total de pasajeros que procesan a la semana (en realidad se conoce el anual pero se supondrá uniforme en todo el año), y se recogen en un vector cuya dimensión es coherente con el cardinal del subconjunto  $H$ ,  $\mathbf{c} = [c_k]$  con  $k = 1, \dots, m$ .

Otra característica importante del *hub* es su **tiempo de conexión**, que es un parámetro decisivo a la hora de entender la localización de rutas y aerolíneas en *hubs*. El vector de tiempos de conexión  $\mathbf{u} = [u_k]$  esta formado por las componentes que recogen la información del **tiempo de conexión objetivo** para cada aeropuerto *hub* en términos promedios (no el mínimo). Este tiempo puede ser corregido con los pesos adecuados para tener el **tiempo de conexión percibido** por el usuario, de manera que se tiene un vector transformado  $\hat{\mathbf{u}} = [\hat{u}_k] = [w_k \cdot u_k]$ .

Además, existe un **tiempo de espera** de difícil cuantificación en el caso del modo aéreo pero que reviste interés porque modela el coste de oportunidad del viaje. De esta manera, los *hubs* han conseguido ser atractivos al viajero porque logran ofrecer mayores frecuencias aunque el tiempo de trayecto sea mayor (un salto directo frente a dos saltos con conexión). Entonces, hay una percepción competitiva, ya sea de forma consciente o inconsciente, ligada a las frecuencias ofertadas y que se relaciona con el coste de oportunidad del viaje.

La figura 2 muestra las fases de vuelo para servicios directos y en conexión con los tiempos asociados a cada una. Se indican además los tiempos iniciales ( $i_I$  y  $i_D$ ) provocados por la diferente oferta en frecuencias, que pueden tener asociados percepciones distintas por los usuarios, según lo expone Hansen (1990) e indica que los vuelos directos son doblemente preferidos por los usuarios a un vuelo en conexión. La composición de los diferentes tiempos de las cadenas se puede formular por la expresión genérica (1).

$$t_T^x = t_E + t_R + t_C \quad (1)$$

donde,  $t_T^x$  es el tiempo total de viaje en el servicio  $x$  (puede ser directo o indirecto),  $t_E$  es el tiempo de espera que depende de la frecuencia del servicio,  $t_R$  es el tiempo de recorrido total y  $t_C$  es el tiempo de conexión. Esta expresión se formula de forma particular como sigue a continuación (2) y (3).

$$t_T^D = \omega_D (2f_D)^{-1} + \frac{d_T}{v} \quad (2)$$

$$t_T^I = \omega_I (2f_I)^{-1} + \frac{d_T}{v} + \frac{\Delta d}{v} + \omega_c t_c \quad (3)$$

donde,  $f_I$  y  $f_D$  es la frecuencia de vuelos indirectos y directos respectivamente;  $d_T$  es la distancia total en vuelo directo;  $\Delta d$  es el incremento de distancia neto por dividir el trayecto en dos saltos;  $v$  es la velocidad del avión (sin contar las diferencias horarias);  $t_c$  es el tiempo de conexión en el *hub*;  $\omega_c$  es el coeficiente de ponderación de tiempo percibido en conexión y, por último,  $\omega_I$  y  $\omega_D$  es el coeficiente de ponderación en tiempo de espera según si el vuelo es directo o indirecto.

Comparando las expresiones anteriores la única forma de competir en tiempo percibido por el usuario del vuelo indirecto con el directo es reduciendo el tiempo de espera para compensar el incremento provocado por el circuito mayor y la conexión. La parte difícil de determinar es una frecuencia competitiva  $f_I$  frente a  $f_D$ , se debe a que en las expresiones aparecen los pesos que ponderan la percepción del usuario  $\omega_I$  y  $\omega_D$  que dependen del mismo usuario, del motivo de viaje, de los aeropuertos en cuestión, etc. Esto da lugar a que los modelos aplicados tradicionalmente sean complejos y requieran costosas validaciones. En cualquier caso, en este modelo sencillo estos pesos se asignarán de forma determinista, sin que esto signifique una merma del valor conceptual del problema propuesto.

El problema se divide en dos partes, por un lado construir una matriz de viajes que integre la cuestión de los trayectos vía *hub* ( $p_i$ - $p_k$ - $p_j$ , donde  $k$  es el *hub*). Para ello se propone utilizar el formalismo de Hansen (1990) que se basa en representar los flujos en una matriz de tres dimensiones, de manera que la última dimensión permite diferenciar los viajes entre aeropuertos que hacen conexión en un *hub*. Se tiene entonces una matriz de viajes  $\mathbf{Q}=[q_{ijk}]$ , donde  $i,j=1\dots n$  y  $k=0,1,\dots,m$  (el nivel 0 se asigna conexiones directas y los  $m$  niveles restantes son para vuelos vía *hub*).

En particular, si se suben los flujos cuyo origen o destino es un *hub* ( $p_k$ ) a su nivel correspondiente, la operación matricial es mucho más simple ( $q_{kj0}=q_{ik0}=0$ ,  $q_{kjk}$  y  $q_{ikk}$  distinto de cero). Las matrices de vuelos y de ocupaciones,  $\mathbf{F}$  y  $\mathbf{O}$  respectivamente, se pueden mantener como matrices normales. Sin embargo, hay que prestar atención a los operadores para manipular adecuadamente cada elemento.

La segunda parte es proponer un método para evaluar correctamente los tiempos de operación en base a la nueva matriz tridimensional. Tener en cuenta la dimensión real del tiempo es básico para construir una matriz corregida de tiempos  $\hat{\mathbf{T}}$  coherente en dimensiones con la propuesta de flujos. Así, evaluar el tiempo total de cualquier par O-D es simplemente el producto de los dos elementos adecuados de la matriz  $\mathbf{Q}$  y  $\hat{\mathbf{T}}$ . Operando sobre la matriz de vuelos y tiempos se pueden expresar las siguientes relaciones (Trapote, 2008):

$$\hat{t}_{ij0} = \omega_D (2f_{ij})^{-1} + \frac{d_{ij}}{v} \quad (4)$$

$$\hat{t}_{ijk} = \omega_I (2 \cdot \min(f_{ik}, f_{kj}))^{-1} + \frac{d_{ik} + d_{kj}}{v} + \omega_c t_{ck} \quad (5)$$

En particular si se evalúan directos desde un *hub* ( $p_k$ ) se tiene:

$$\hat{t}_{kjk} = \omega_D (2f_{kj})^{-1} + \frac{d_{kj}}{v} \quad (6)$$

$$\hat{t}_{ikk} = \omega_D (2f_{ikk})^{-1} + \frac{d_{ik}}{v} \quad (7)$$

Por lo tanto, la evaluación del tiempo de todos los usuarios es trivial y está dada por la siguiente función.

$$FT = \sum_{\forall k} \sum_{\forall i} \sum_{\forall j} \hat{t}_{ijk} \cdot q_{ijk} \quad (8)$$

Entonces, suponiendo que existe equilibrio en el sistema descrito, el problema consiste en evaluar como se redistribuyen los flujos al aumentar las frecuencias de vuelos en un determinado *hub*. El modelo consiste en determinar un *hub* de interés  $\beta$  e introducir un incremento de frecuencias  $\Delta f_{i\beta} = \Delta f_{\beta j} = \Delta f_{\beta}$ . Automáticamente, las nuevas expediciones provocan que por el sólo hecho de mejorar el tiempo de espera se modifique la cadena de desplazamientos y provoque una reasignación de flujos. Los esquemas que se presentan en las figuras 4 y 5 muestran conceptualmente esta idea: (i) recuperación de los viajeros en la ruta  $p_i - p_j$  que conectaban en  $p_k$ , con  $k=1, \dots, \beta-1, \beta+1, \dots, m$ ; (ii) robo de conexiones a *hubs* vecinos si existe excedente de capacidad y el tiempo es competitivo o mejorando la oferta.

El incremento de flujo que se provoca en las rutas indirectas se puede calcular de forma incremental y en proporción a los flujos de pasajeros originales: Se define un subconjunto  $S_H \subseteq H$  de los que se recupera tráfico.

$$\Delta q_{\beta k} = \frac{q_{\beta k}}{\sum_{\forall l \in S_H} q_{\beta l}} \Delta q_{\beta j} (\Delta f_{\beta j}) \quad (9)$$

Por lo que respecta al mecanismo de robo de viajeros se tiene el esquema de la figura 5, donde, el incremento de flujo que se provoca en las rutas indirectas se puede calcular de forma incremental y en proporción a los flujos de pasajeros originales que no eran tan competitivos en tiempo. Se define un subconjunto  $S'_H \subseteq H$  que contiene para cada caso estos aeropuertos que su cadena no puede competir en tiempo. Se cumplen las siguientes expresiones.

$$\forall k \in S'_H, \quad \Delta q_{ik} = \Delta q_{kj} \quad (10)$$

$$\Delta q_{ik} = \Delta q_{kj} = \frac{q_{\beta k}}{\sum_{\forall l \in S_H} q_{\beta l}} \Delta q_{i\beta} (\Delta f_{i\beta}) \quad (11)$$

La redistribución de flujos es un problema complejo pues el mecanismo es válido para todos

los aeropuertos y se iniciaría un juego competitivo de robo de viajeros. Esto es esencialmente un planteamiento de teoría de juegos. Sin embargo, en este modelo se propone algo menos ambicioso: un mecanismo de recuperación y robo de viajeros a otros *hubs* (ver hipótesis), de manera que se minimiza el tiempo total en desplazamientos (se expresa como suma ya que los efectos se añaden pero no es lineal).

$$\min FT' = \min \left[ \sum_i \sum_j \sum_k \hat{t}_{ijk}(f_{ij}) q_{ijk}(f_{ij}) + \sum_i \sum_j \sum_k \hat{t}_{ijk}(\Delta f_{\beta}) \cdot q_{ijk}(\Delta f_{\beta}) \right] \quad (12)$$

Donde la variable de decisión es un vector  $\Delta \mathbf{f}_{\beta} = [\Delta f_{i\beta} \Delta f_{\beta j}]$  y está sujeta a ser entera y no negativa. Se identifica el *hub* objeto del incremento de expediciones como  $\beta \in H$ .

### 3.2. Hipótesis

El desarrollo de este modelo se basa en una serie de hipótesis (en la aplicación se realizan nuevas consideraciones pero se deben a cuestiones prácticas relativas a los datos):

**H1.** Se supone que la demanda total se conserva. Esto quiere decir que el modelo propuesto será capaz de reasignar flujos de viajeros pero en ningún caso provocará alteraciones sobre el total de usuarios movilizados. Entonces, no se considera el efecto sobre la demanda del incremento de frecuencias (demanda potencial).

**H2.** No se consideran las posibles estrategias de competitividad de otras compañías que operan en otros *hubs* para retener sus cuotas de conexión. Esto es así en virtud de que el modelo solo considera el tiempo como variable. Sin embargo, se sabe que las respuestas competitivas pueden ser en frecuencias y en tarifas, lo que lleva a una hipótesis adicional que se expone a continuación.

**H3.** El modelo propuesto es una simplificación en cuanto no considera el efecto de la variación de tarifas sobre la organización de rutas. La calibración de un modelo que integre las variables tiempo y coste y, que además, tenga en cuenta estrategias competitivas no cooperativas de las compañías es una tarea compleja que requiere de una gran cantidad y calidad de datos. De esta manera, se elimina en esta metodología cualquier planteamiento de teoría de juegos, aunque el modelo sienta unas bases de ésta para futuros desarrollos.

**H4.** Se considera en el modelo unos tiempos de conexión determinados y fijos, constituye una vez más una simplificación del modelo. Que además asume que la segunda fase de una conexión *hub* es esclava de la primera, esto en realidad no pasa, ya que la elección de la cadena se hace valorando los dos saltos.

**H5.** La determinación de los coeficientes de peso para ponderar la percepción del tiempo por parte del usuario exigirían un estudio específico y éste incluiría una calibración. En este artículo se consideran: (i)  $\omega_c = 1$ ; (ii)  $\omega_l = 2$ ; (iii)  $\omega_D = 1$ .

**H6.** Rutas con dos saltos como máximo, por lo tanto, una conexión.

### 3.3. Ajuste de la matriz de viajes

La construcción de la matriz de tres dimensiones propuesta exige una asignación de los flujos

que están bien determinados por la matriz  $\mathbf{M}$ . Esta asignación se hace por mínimos cuadrados y debe satisfacer la conservación de la demanda y las tasas de conexión por aeropuerto.

Sea el vector de flujo de salidas (*departures*) total para los  $n$  aeropuertos ( $v_D$ ).

$$v_D(i) = \sum_{j=1}^n q_{ij0} + \sum_{k=1}^m \left[ \sum_{j=1}^n q_{ijk} + \delta_{ik} \sum_{\substack{\forall i \\ i \neq k}} \sum_{\substack{\forall j \\ j \neq k}} q_{ijk} \right] \quad (13)$$

Sea el vector de flujo de llegadas (*arrivals*) total para los  $n$  aeropuertos ( $v_A$ ).

$$v_A(j) = \sum_{i=1}^n q_{ij0} + \sum_{k=1}^m \left[ \sum_{i=1}^n q_{ijk} + \delta_{jk} \sum_{\substack{\forall i \\ i \neq k}} \sum_{\substack{\forall j \\ j \neq k}} q_{ijk} \right] \quad (14)$$

donde se ha utilizado la función delta de Kronecker ( $\delta_{ij}=1 \ \forall i=j$ ,  $\delta_{ij}=0 \ \forall i \neq j$ ) para facilitar la formulación correcta. Se tiene un vector de pasajeros en conexión ( $v_C$ ).

$$v_C(k) = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n 2q_{ijk} \quad (15)$$

Entonces se debe anular la componente cuadrática del error dada por la siguiente expresión.

$$F(\mathbf{Q}) = \left[ \sum_{i=1}^n \left( v_D(i) - \sum_j m_{ij} \right)^2 + \sum_{j=1}^n \left( v_A(j) - \sum_i m_{ij} \right)^2 + \sum_{k=1}^m \left( v_C(k) - c_k \left( \sum_{j=1}^n m_{kj} + \sum_{i=1}^n m_{ik} \right) \right)^2 \right] \quad (16)$$

El problema se formula como un cero de funciones, según la expresión (17).

$$F(\mathbf{Q}) = 0 \quad (17)$$

Sin embargo, la práctica puede acabar imponiendo que se deba asumir una componente de error debido a la complejidad del problema, que está provocada por la dimensión de la variable matricial incógnita. En cualquier caso el problema pasa a ser una minimización de la función  $F(\mathbf{Q})$  sujeta a  $q_{ijk} \geq 0$ . Esto se resuelve mediante una rutina de cálculo numérico que realiza esta minimización en base a repartos ponderados por aportación sobre el total.

### 3.4. Métricas de evaluación

Se proponen las siguientes métricas de evaluación para evaluar el grado de cumplimiento de los objetivos propuestos.

- Incremento de conexiones en un aeropuerto *hub* ( $p_k$ ):  $I_k$ , que está dado por la siguiente expresión. Donde la notación  $[\cdot]_N$  y  $[\cdot]_V$  indican el estado nuevo y viejo, respectivamente.

$$I_k = [c_k]_N - [c_k]_V \quad (18)$$

- Incremento de pasajeros totales en el aeropuerto *hub* ( $p_k$ ):  $\Delta V_k$ , según la expresión.



$$\Delta V_k = [V_k]_N - [V_k]_V \quad (19)$$

- Incremento relativo de pasajeros totales en el aeropuerto *hub* ( $p_k$ );  $rV_k$ , según la expresión.

$$rV_k = \frac{\Delta V_k}{[V_k]_V} \quad (20)$$

#### 4. METODOLOGÍA DE CÁLCULO

La técnica de minimización que se va a utilizar se desarrolla *ad-hoc* para este problema ya que es muy concreto, las variables son discretas y la complejidad de formalización en un lenguaje o *Solver* comercial de las hojas de cálculo puede ser ineficaz. Entonces, se construye un algoritmo metaheurístico que irá logrando mejoras progresivas de una solución inicial que es el estado actual. El algoritmo se implementa en Matlab y permite resolver la cuestión de manera bastante eficiente ya que el modelo tiene una estructura particular que lo permite (matriz en niveles para modelar mejor la operación *hub&spoke*, matriz de frecuencias, tiempos y simplificación a un único salto). Para ello se procede según los pasos que se indican a continuación.

El concepto es, dada una matriz de frecuencias entre aeropuertos  $F$  y una matriz en tres dimensiones de flujos  $Q$ , se deben detectar las componentes de esta última matriz que tienen tiempos de viaje total ( $\hat{t}_{ijk}$ ) superiores a los que se podría ofertar desde el *hub* que se desea potenciar o en su defecto, analizar si incrementando la frecuencia en una unidad durante el periodo de estudio se capta suficiente demanda como para justificar sucesivos incrementos de pasajeros.

A continuación se desarrollan esquemáticamente los dos mecanismos propuestos para captar tráfico: un mecanismo de recuperación de pasajeros y un mecanismo de robo de pasajeros. Estos dos mecanismos aplicados en sus respectivas fases constituyen el algoritmo que permite evaluar el potencial de un aeropuerto. Previamente, se considera en lo sucesivo que el *hub* de interés ocupa el nivel superior de la matriz tridimensional propuesta (por simplicidad) y por notación será:  $\beta$ .

##### 4.1. Mecanismo de recuperación de pasajeros

La mecánica se basa en explorar todas las relaciones punto a punto con origen o destino el *hub*  $\beta$  de manera que se decide si es preciso aumentar frecuencias para recuperar pasajeros que estén siendo servidos haciendo escala en otro *hub* competidor. Se identifican cuatro situaciones y en base a ellas se desarrolla el algoritmo.

**Caso 1.** Existen frecuencias sirviendo el par  $(i, \beta)$  y  $(\beta, i)$  desde  $\beta$ .

1. Este caso se basa en explorar todos los hubs con  $k \in H - \{\beta\}$  que estén conectando estos pares y se toma un conjunto tal que el tiempo en realizar  $i \rightarrow k \rightarrow \beta$  o  $\beta \rightarrow k \rightarrow i$  sea superior a la conexión directa.
2. Por lógica, la conexión directa es más competitiva que las del conjunto y reforzándola se podría recuperar la demanda, de manera que todo el flujo  $q_{ik\beta}$  da

lugar a un incremento de frecuencias  $\Delta f_{i\beta}$  y  $q_{\beta ki}$  provoca  $\Delta f_{\beta i}$ , donde se debe tomar la máxima de las dos.

3. Además, este incremento en las frecuencias de servicio provoca que se deban volver a revisar todos los *hubs* alternativos pues se han modificado los tiempos totales en el par directo por efecto del refuerzo, de nuevo es posible captar más flujo en algunas relaciones.
4. Por simplicidad, este nuevo flujo solo será el necesario para elevar la ocupación promedio a la máxima permitida (pasajeros/plazas) y se extrae de las rutas indirectas alternativas de forma proporcional

**Caso 2.** Solo existen frecuencias en un par  $(i, \beta)$  pero no en  $(\beta, i)$ .

1. Este caso se basa en explorar todos los *hubs* con  $k \in H - \{\beta\}$  que estén conectando el par  $(i, \beta)$  y se toma un conjunto tal que el tiempo en realizar  $i \rightarrow k \rightarrow \beta$  sea superior a la conexión directa.
2. Por lógica, la conexión directa es más competitiva que las del conjunto y reforzándola se podría recuperar la demanda, de manera que todo el flujo  $q_{ik\beta}$  da lugar a un incremento de frecuencias  $\Delta f_{i\beta}$ . Por simetría y simplicidad en la operación *hub&spoke*,  $\Delta f_{\beta i} = \Delta f_{i\beta}$ .
3. De nuevo se repiten los pasos 3 y 4 del caso 1.

**Caso 3.** Simétrico al caso 2 pero con frecuencias en  $(\beta, i)$  pero no en  $(i, \beta)$ .

**Caso 4.** No existen frecuencias en ninguno de los dos pares estudiados. Se analiza el efecto de introducir un vuelo directo en sentido  $(\beta, i)$  y en la vuelta  $(i, \beta)$ .

- Una vez activadas estas nuevas frecuencias se recalculan los tiempos de viaje y es posible analizar con que *hubs* del conjunto se puede competir ofreciendo una relación directa más rápida que el vuelo en conexión.
- Si todos los pasajeros captados justifican el vuelo en términos de ocupación media (sea esta la referencia mínima de rentabilidad) se considera activado. Si no es así, se considera no activado.
- En este caso, solo se activa una expedición por sentido e indica la elasticidad de la demanda frente a nuevas rutas que en la actualidad no existen.

## 4.2. Mecanismo de robo de viajeros

A continuación se resumen las ideas básicas que permiten desarrollar el algoritmo para modelar la captación de tráfico de conexión en el *hub*  $\beta$ , que en la actualidad conecta en otros *hubs* del conjunto.

**Estado 1:** dado que el mecanismo de recaptura ha incrementado frecuencias, la matriz de tiempos ha variado y en este estado puede haber conexiones más competitivas en el *hub* de interés,  $\beta$ .

- Para todo par  $(i, j)$  con  $i \neq \beta$  y  $j \neq \beta$ , se exploran las conexiones que se realizan en otros *hubs* y se compara el tiempo de desplazamiento frente a conectar en  $\beta$ , si es más competitivo el nuevo camino se guarda el cambio. También se compara con  $k=1$ , por si una nueva conexión indirecta compite con una directa, esto puede suceder por el tiempo de espera.

- Para todos los cambios realizados para todos los pares  $(i, j)$  se calcula el flujo total captado para origen común  $i$  y para destino común  $j$ . Con esto se procede al cálculo del incremento de frecuencias.

**Estado 2:** puesto que es muy probable que no se haya variado en exceso la cifra de conexiones, se plantea un estado más avanzado que supone una **cota superior absoluta** para todo el planteamiento y es, incrementar en una unidad todos los saltos servidos desde  $\beta$ .

- Se incrementan todas frecuencias en los pares  $(\beta, j)$  y  $(i, \beta)$  y se recalculan los tiempos de desplazamiento.
- De nuevo se comparan los tiempos de las conexiones  $(i, j)$  con  $i \neq \beta$  y  $j \neq \beta$ , las que hacen conexión en el *hub* de interés  $\beta$  con las que lo hacen directo o a través de los  $m-1$  *hubs* alternativos. Se guardan aquellos flujos que serán captados por la nueva oferta.
- Realizando la misma consolidación de flujos que se hizo en el estado 1 se puede determinar el nuevo incremento absoluto de pasajeros que conectan a través del *hub*  $\beta$ .

## 5. APLICACIÓN A BARCELONA

El modelo se aplica en concreto al caso de Barcelona teniendo en cuenta el entorno competitivo. En particular, se han considerado solo cinco *hubs* adicionales: MAD, FRA, LHR, CDG, AMS. El motivo es que se considera que solo estos son capaces de captar tráfico de Barcelona. Es entonces una hipótesis que simplifica el modelo de cara a evaluar la metodología y las posibilidades de BCN.

### 5.1 Escenario analizado

El modelo se aplica al caso de Barcelona (BCN) considerándolo *hub* y teniendo en cuenta que la ampliación actual entra en funcionamiento, de manera que los tiempos de conexión no están afectados por limitaciones de capacidad (trasladadas a retrasos). Lo mismo para el aeropuerto de Madrid (MAD). Sin embargo, sí se consideran saturados los restantes cuatro *hubs* de la aplicación: LHR, CDG, FRA, AMS, por ello sus niveles de retraso si se incluyen. No se tendrá en cuenta en el modelo ninguna consideración más de agotamiento de la capacidad al variar las frecuencias.

El escenario encaja temporalmente en situación actual y por lo tanto los resultados reflejan horizontes temporales a corto plazo, téngase en cuenta que períodos de 10 ó 15 años significa doblar tráficos; esto no se considera. Pero si se considera que se trabaja con demanda satisfecha en cuanto a que los datos que se introducen en el modelo son datos de tráfico de Eurostat del año del 2005 como se detalla a continuación.

Por último, el modelo solo trabaja con la parte temporal del coste generalizado (que es tarifa y tiempo). Esto provoca que el escenario dé una evaluación de cual sería la cota superior de captación de tráfico. En ningún momento se dibuja un escenario en que los competidores respondan. Esto sería así si se iterase con el mismo modelo variando el *hub* objetivo hasta llegar a equilibrios en las reasignaciones de la demanda.

### 5.2 Datos de partida

En este punto se realiza un inventario descriptivo de los datos utilizados en la aplicación del

modelo al caso de BCN. Principalmente datos relativos a operaciones de aeronaves: expediciones, tráfico de pasajeros y de asientos entre pares OD.

La matriz de vuelos y flujos de pasajeros OD se construye a partir de los datos por ruta OD de Eurostat del 2005. Dado que los datos del Eurostat para rutas OD están aforados en cada aeropuerto contando los pasajeros que salen a todos los destinos y los que llegan de todos los orígenes, se tienen forzosamente dos matrices que pueden ser balanceadas para compensar los posibles errores (Eurostat tiene errores, pero son datos públicos y accesibles).

Esto da lugar a un matriz OD de gran tamaño (1.208 x 1.208 elementos) que después es reducida en base a relaciones significativas para simplificar el cálculo numérico. Para determinar estas relaciones se han analizado los acumulados por orígenes más destinos para los aeropuertos *hub* del estudio (BCN, MAD, LHR, FRA, CDG, AMS).

Con origen Eurostat se tienen datos de pasajeros por ruta, vuelos y frecuencias. Partiendo del dato de un año se toma el valor promedio para una semana. Además, el resto de datos como las conexiones se toman de datos ACI (2005) y AEA (2003). Esto ha sido, considerando un tiempo de escala de 90 minutos como base más la duración de un retraso promedio en cada *hub*.

Finalmente, se destaca la necesidad de tener distancias de vuelo entre aeropuertos (*Great Circle*) que se obtiene de la base de datos OAGMax 2005 que se ha podido consultar en el desarrollo de este modelo.

### 5.3 Resultados

La aplicación sucesiva de los dos mecanismos diseñados para evaluar la nueva cota superior de pasajeros ha permitido determinar que el aeropuerto de Barcelona podría incrementar su volumen anual de pasajeros en 7.451 pasajeros semanales directos gracias a 108 frecuencias nuevas que recapturarían pasajeros que actualmente tienen que conectar en otro aeropuerto (Trapote, 2008); esta cifra equivale aproximadamente a un total de 387.452 pasajeros anuales. Los pasajeros robados a otros *hubs* son en por semana 65.811 y un porcentaje de conexiones del 20% (se partía del 12%), considerando la primera parte del mecanismo de robo que solo contabiliza los pasajeros que les compensa cambiar el *hub* de conexión en base a las frecuencias ofertadas. Por otra parte, si se considera la fase última de este mecanismo que activa frecuencias adicionales para evaluar si algún pasajero desea cambiar, se llega a 108.012 pasajeros semanales y se alcanza casi el 30% de conexiones; sin embargo este escenario es excesivamente favorable y poco conservador para la filosofía de las aerolíneas.

En términos totales se pasa de 285.190 pasajeros a la semana a 365.391, un salto de 38.000 pasajeros. Anualmente, el incremento es de 4 millones aproximadamente. De estos, algo más del millón y medio son nuevas conexiones.

Finalmente, los resultados revelan que el aeropuerto de Barcelona podría incrementar en un 8% su cuota de conexiones. Por lo tanto, llegaría a un 20%, similar a otros aeropuertos *hub* europeos pero no alcanzaría el nivel de los principales. Téngase en cuenta que este modelo por no integrar competitividad en tarifas proporciona un resultado optimista, por lo tanto, una cota superior basada en demanda satisfecha.

## 6. CONCLUSIONES

En primer lugar, los sistemas aeroportuarios de los países comparados tienen en común un alto grado de centralidad del tráfico internacional sobre sus aeropuertos *hub*, esto se debe a la necesidad de las aerolíneas de operar con economías de escala.

Entonces, se concluye que la descentralización operativa puede ser una estrategia eficiente para paliar los efectos que tiene la saturación en los principales *hubs* sobre las operaciones de las aerolíneas; sin embargo, esta lleva asociada una inevitable deseconomía de escala. En parte esto sucede actualmente ya que las grandes aerolíneas que operan en los *hubs* vuelos internacionales también dominan cuotas importantes de operaciones de los principales aeropuertos secundarios y las especializan en tráficos comunitarios.

En segundo lugar y en relación a la propuesta metodológica que se ha desarrollado, se constata que ésta es una herramienta adecuada para cuantificar el potencial de desarrollo *hub* de un aeropuerto. Dadas las simplificaciones del modelo, es útil para determinar una cota superior de nuevos pasajeros que son fruto de una reasignación de la demanda satisfecha.

La aplicación al caso del aeropuerto de Barcelona ha demostrado con un incremento limitado de conexiones (se pasa del 12% al 20%) que la promoción del aeropuerto a *hub* es difícil en entornos competitivos en que las estructuras *hub&spoke* están tan consolidadas (aeropuertos *hub* de primer orden concentrados en poco territorio, gran oferta de vuelos, porcentajes de conexión elevados, etc.). Sin embargo, el modelo ha revelado que el crecimiento del aeropuerto debe empezar consolidando un conjunto de vuelos directos internacionales y comunitarios que favorecerán el posicionamiento estratégico de la infraestructura en el contexto aeroportuario europeo y consolidará una masa crítica que le permita en el futuro desarrollar una base de conexiones.

## REFERENCIAS

- AEA, 2003. *Operating economy of AEA airlines summary report*. Association of European Airlines.
- Aena, 2005. *Aeropuerto de Barcelona. Anuario estadístico 2004*. Ed. Aena Aeropuerto de Barcelona.
- Comisión Europea, 2002. *Study on Competition between Airports and the Application of State Aid Rules*. Cranfield, 2002
- Eurostat, 2007. *Traffic report*. European Communities.
- Hansen, M. 1990. *Airline competition in a hub-dominated environment: an application of non-cooperative game theory*. Transport Research Board.
- Stelter, D., et al. 2004. *Airports – Down of a Era*. Boston Consulting Group. Munich, Germany.
- Trapote, C., 2008. *Modelo de gestión descentralizada de una red de aeropuertos*. Tesina de graduación de la titulación de Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, dirigida por el Prof. Francesc Robusté. ETS Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, Universidad Politécnica de Cataluña.

### Bases de datos:

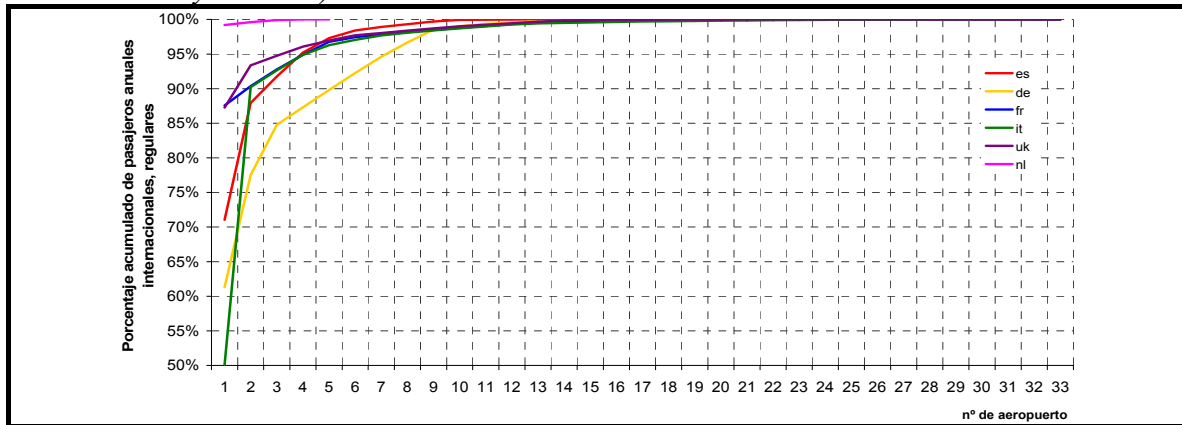
- Aena, 2005. Estadísticas anuales. Aeropuertos Españoles y Navegación Aérea.

ACI, 2005. Worldwide Airport Traffic Report. Airport Council International.

Eurostat, 2005. Statistics of Air Transport Passengers.

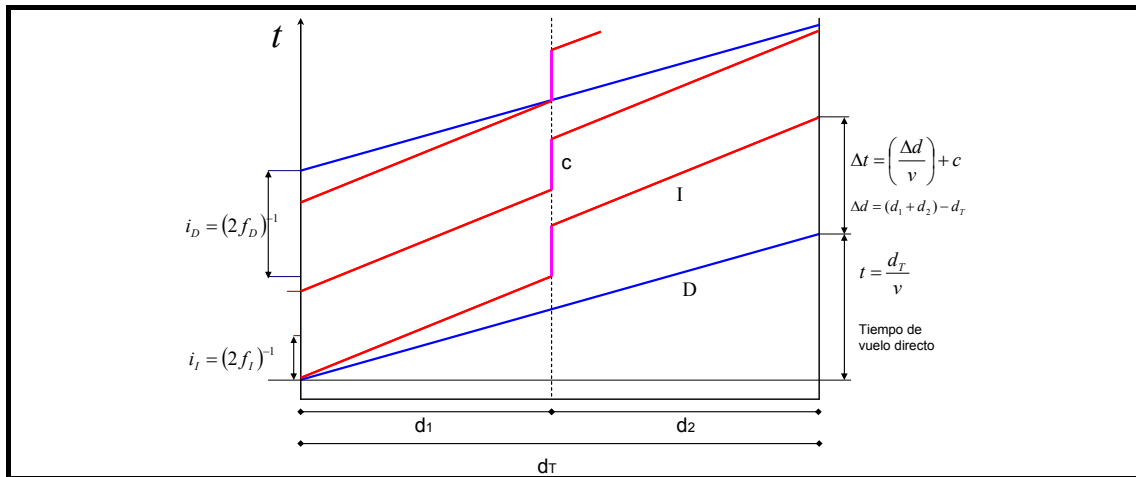
OAG, 2005. OAG Max. August 2005. Official Airline Guide.

**Fig. 1.** Distribución acumulada en porcentaje de tráfico anual internacional (no comunitario) y regular de pasajeros en los aeropuertos de los estados analizados (asumiendo MAS en París y Londres).



Fuente de los datos: Eurostat, 2005.

**Fig. 2.** Desarrollo de las fases de viaje de un par origen-destino en vuelo directo o en conexión.



**Fig. 3.** Recorrido directo y en conexión o indirecto entre aeropuertos.

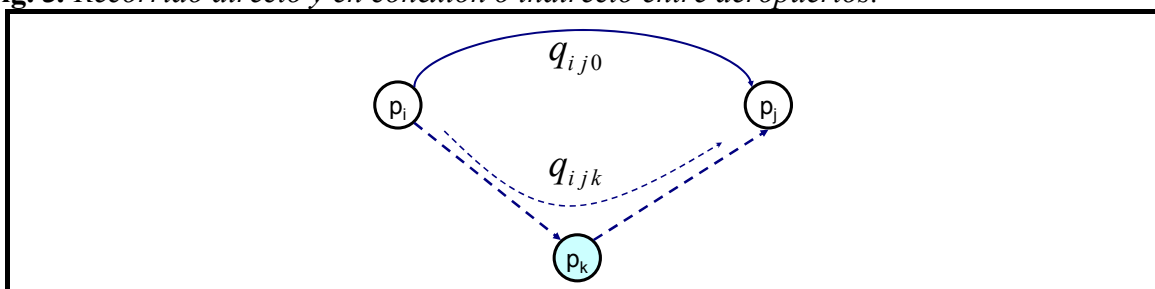


Fig. 4. Esquema de recuperación de viajeros que conectaban en hubs vecinos.

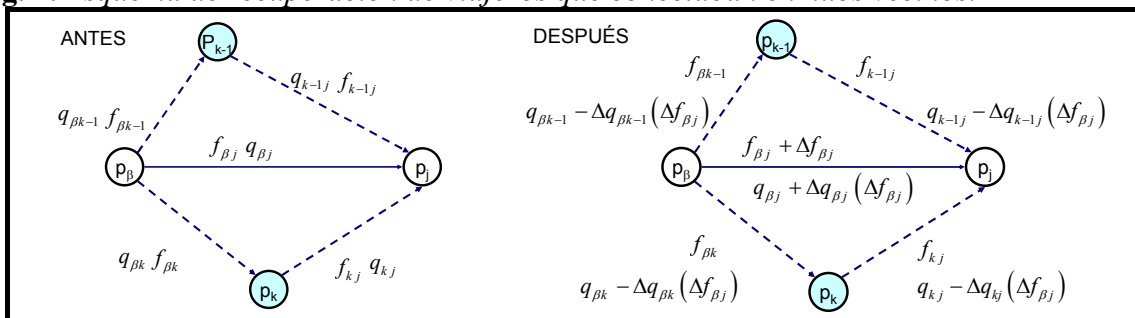


Fig. 5. Esquema de robo de viajeros que conectaban en hubs vecinos.

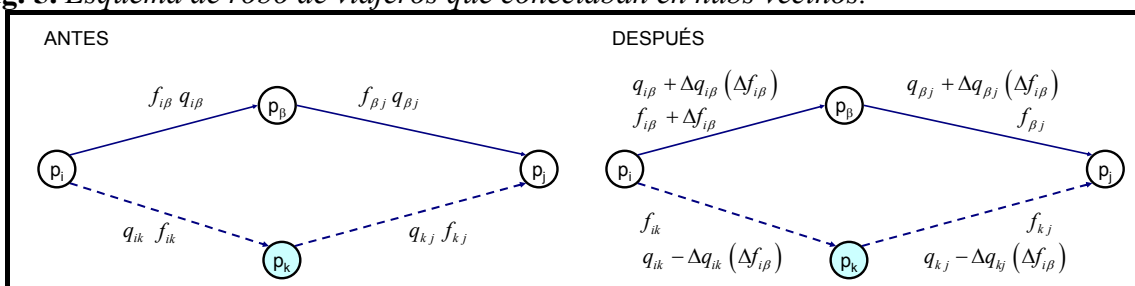


Fig. 6. Evolución de pasajeros totales en las diferentes fases de la aplicación del modelo.

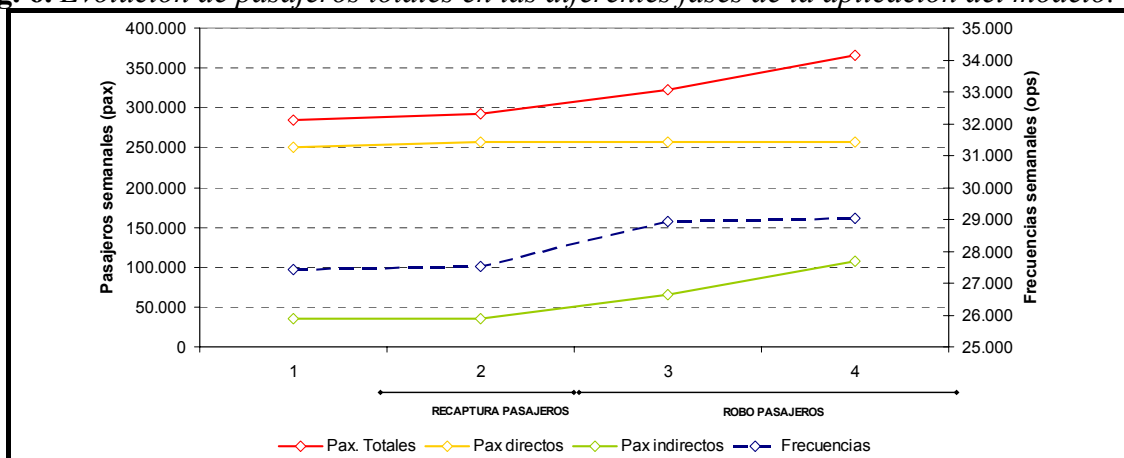


Tabla 1. Valores alcanzados en BCN como hub al implantar las fases sucesivas del modelo.

	Frecuencias	Pax directos	Pax indirectos	Pax. Totales	Conexiones
Origen	27.428	249.928	35.262	285.190	12,36%
Fase 1	27.536	257.379	35.262	292.641	12,05%
Fase 2	28.929	257.379	65.811	323.190	20,36%
Fase 3	29.041	257.379	108.012	365.391	29,56%