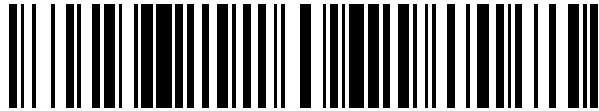


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 476 566**

21 Número de solicitud: 201231942

51 Int. Cl.:

**G06Q 10/06** (2012.01)

12

SOLICITUD DE PATENTE

A1

22 Fecha de presentación:

14.12.2012

43 Fecha de publicación de la solicitud:

14.07.2014

56 Se remite a la solicitud internacional:

PCT/ES2013/070878

71 Solicitantes:

**UNIVERSITAT DE LES ILLES BALEARS (100.0%)**  
**Campus Universitario. Ctra. de Valldemorsa, km.**  
**7,5. Edifici Son Lledo**  
**07071 Palma de Mallorca (Illes Balears) ES**

72 Inventor/es:

**RAMASCO SUKIA, José Javier;**  
**MARTINEZ EGUILUZ, Víctor y**  
**FLEURQUIN AMOROS, Pablo**

74 Agente/Representante:

**TEMIÑO CENICEROS, Ignacio**

54 Título: **MÉTODO PARA CARACTERIZAR LA CONGESTIÓN AEROPORTUARIA EN UNA RED DE TRÁFICO AÉREO**

57 Resumen:

Método para pronosticar la congestión aeroportuaria en una red de tráfico aéreo que combina tanto un algoritmo basado en colas de espera, como las relaciones entre vuelos propias de la planificación de cada aerolínea y que se caracteriza porque establece una simulación basada en la rotación de cada aeronave, los vuelos en conexión, congestión aeroportuaria y retrasos aleatorios; y donde un quinto factor simula las perturbaciones externas; y donde además se establece un proceso de gestión de los aeropuertos independiente del proceso de simulación.

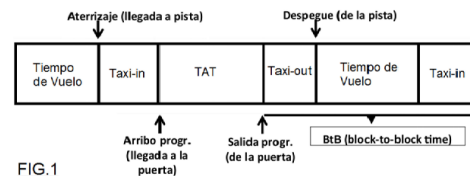


FIG.1

## DESCRIPCIÓN

### MÉTODO PARA CARACTERIZAR LA CONGESTIÓN AEROPORTUARIA EN UNA RED DE TRÁFICO AÉREO

#### Objeto de la invención

5 La presente invención se refiere a una metodología y un conjunto de procedimientos con el fin de caracterizar y pronosticar la congestión aeroportuaria en una red de tráfico aéreo. Concretamente, el modelo es capaz de predecir, sin necesidad de un aporte de datos en tiempo real, el retraso generado en los vuelos y su repercusión en el rendimiento de los aeropuertos que componen la red.

10

#### Estado de la técnica

De acuerdo con el informe del año 2008 del “Congress Joint Economic Comitee” de los EEUU [*Joint Economic Committee of US Congress, Your flight has been delayed again: Flight delays cost passengers, airlines and the U.S. economy billions. Available at*  
15 *http://www.jec.senate.gov (May 22, 2008)*] el retraso en los vuelos generó en el 2007 un impacto económico que asciende a los 40,700 millones de dólares, solamente para los Estados Unidos. Analizando los datos de Eurocontrol, el impacto para el continente europeo es similar [*ICCSAI Fact Book on Air Transport in Europe. Available at http://www.iccsai.eu (2007-2011); 3. Eurocontrol Annual report. Available at http://www.eurocontrol.int (2008-*  
20 *2011); Jetzki, M. The propagation of air transport delays in Europe. Thesis in the Department of Airport and Air Transportation Research, RWTH Aachen University (2009)*]. De acuerdo con las estimaciones del crecimiento del tráfico aéreo para las próximas décadas, la situación puede volverse todavía peor.

25 En [*Folkes, V.S., Koletsky, S., & Graham, J.L. A field study of casual inferences and consumer reaction: The view from the airport. Journal of Consumer Research 13, 534-539 (1987)*], los retrasos en los vuelos deterioran la imagen de la compañía para con sus clientes, además de dañar los balances de la compañía por el incremento de los costes operativos de las mismas. Desde el punto de vista del cliente, los retrasos pueden  
30 ocasionarle pérdida de oportunidades de trabajo, de tiempo de ocio y actividades económicas, entre otras. De forma adicional, los esfuerzos para recuperar los retrasos generan un fuerte impacto medioambiental por el mayor consumo de combustible.

Todo lo anterior muestra la necesidad de una herramienta que sea capaz de evaluar, a priori, la eficiencia y robustez de una programación de vuelos y/o pronosticar para un día en particular el impacto de los retrasos en una red de tráfico aéreo. En el actual estado de la  
35

técnica, son conocidos sistemas que permiten predecir, dentro de un cierto margen, la situación para las próximas horas utilizando la entrada de datos en tiempo real. Estos son los objetivos, por ejemplo del documento US 6393359 o métodos similares al “delay index” de flightstats.com.

5

En el estado de la técnica conocido se describe el documento de patente americana US2009112645 (LOCKHEED MARTIN CORPORATION) introduce un sistema de planificación y optimización del flujo del tráfico aéreo que incluye un módulo de simulación que permite la introducción de parámetros estratégicos iniciales (planes de vuelo, 10 previsiones meteorológicas, etcétera) para la obtención de datos y recomendaciones que permitan adoptar decisiones que conduzcan a una eficiente gestión de la demanda, seguridad y recursos en una red de tráfico aéreo (minimizar retrasos de los vuelos o la congestión en aeropuertos).

15 Este documento apunta hacia un concepto totalmente distinto al de la presente invención, no solo teniendo en cuenta la cantidad de aviones dentro de un sector sino también otros factores. El objeto de la presente invención es caracterizar y predecir los retrasos en una red aeroportuaria. El objeto es totalmente distinto.

20 El documento de patente PCT WO2008061793 A1 (FRAPORT AG) presenta un sistema y método para la gestión del tráfico aéreo de un aeropuerto. El sistema hace uso de pronósticos y datos en tiempo real para gestionar de forma óptima las distintas fases de los vuelos en su aproximación, aterrizaje, estancia y despegue en el espacio aeroportuario, con el objetivo de evitar retrasos y realizar una mejor utilización de su capacidad. Este 25 documento adolece de un modelado de toda la red aeroportuaria y no de un único aeropuerto.

El documento de patente americana US2010185426 (GANESAN et al.) describe un sistema de predicción del tiempo de “taxi-out” para vuelos en un aeropuerto mediante el uso 30 de un módulo de simulación y aprendizaje que actúa de forma iterativa y modela la dinámica aeroportuaria durante un espacio de tiempo. Este documento no predice el retraso de un único vuelo.

El documento de patente PCT WO2008103654 (LOCKHEED MARTIN CORPORATION) describe un conjunto de sistemas y métodos para planificar y optimizar una diversidad 35

de planes de vuelo que compiten en un espacio aéreo en un periodo de tiempo dado. Hace uso de un filtro de Pareto y un optimizador genético multi-objetivo para identificar la solución más adecuada que conduce a una reducción en la distancias de vuelos y congestión de la red. Al igual que en un documento anterior se apunta hacia un concepto totalmente distinto al de la presente invención, no solo teniendo en cuenta la cantidad de aviones dentro de un sector sino también otros factores. El objeto de la presente invención es caracterizar y predecir los retrasos en una red aeroportuaria. El objeto es totalmente distinto.

En general, ninguno de los documentos citados permite predecir el estado del tráfico aéreo sin necesidad de entrada de datos en tiempo real. Por tanto, se hace necesario un sistema y método que permita pronosticar la evolución de la congestión teniendo simplemente en cuenta las condiciones iniciales.

### **Descripción de la invención**

Es un objeto de la presente invención desarrollar un método, un sistema y un programa informático que permita caracterizar y predecir el estado del tráfico aéreo sin necesidad de entrada de datos en tiempo real. En otras palabras, que no sea necesaria la situación de la ventana horaria anterior para pronosticar las próximas horas, ya que esto no es siempre posible y deteriora el pronóstico, impidiendo su evaluación con mayor antelación. En la presente invención, de hecho, solamente será necesaria la programación de los vuelos y las condiciones iniciales en las primeras horas de la mañana para pronosticar la evolución de la congestión.

La invención, además, permite la evaluación de la robustez de la programación diaria de una aerolínea o de una alianza a la introducción de retrasos primarios en la red por distintas causas, desde meteorológicas hasta conflictos de índole laboral.

Así pues, la presente invención, en un primer aspecto, consiste en un método que simula la dinámica de propagación de los retrasos en una red de tráfico aéreo combinando dentro de dicha simulación, tanto un algoritmo basado en colas de espera, como las relaciones entre vuelos propias de la planificación de cada aerolínea. Más concretamente, la simulación se basa en cuatro factores internos del sistema: rotación de cada aeronave, vuelos en conexión, congestión aeroportuaria y retrasos aleatorios; y donde un quinto factor simula las

perturbaciones externas, como las meteorológicas o laborales (por ejemplo, huelgas del personal).

5 Preferentemente, se utiliza un intervalo de tiempo de un minuto y se procede en cada simulación hasta que todos los vuelos hayan completado su itinerario, en la mayoría de los casos, ligeramente por encima de los 1440 minutos. Este intervalo de tiempo permite a la simulación ejecutar acciones en una escala de tiempo realista. En el caso de que existan vuelos entre distintas zonas horarias se debe convertir todos los datos a una misma zona horaria.

10

El efecto técnico principal del método de la invención es la obtención de información para caracterizar una red de tráfico aéreo, de forma que dicha información pueda ser utilizada para generar pronósticos acerca del nivel de congestión en una red de tráfico aéreo, sin la necesidad de aportar datos sobre dicha red en tiempo real. Las ventajas derivadas de dicho efecto técnico implican, por ejemplo, la evaluación de la capacidad de la programación de una aerolínea, o del sistema de tráfico en su conjunto, de absorber los retrasos generados, antes de ser implementada. Por otro lado, el método de la invención proporciona la flexibilidad de introducir cualquier tipo de perturbación al sistema para evaluar la robustez del mismo ante potenciales impactos de diversa índole como las condiciones meteorológicas adversas y los conflictos laborales que amenacen la operativa normal de una o varias aerolíneas. Del mismo modo, la invención es capaz de estimar a priori en un día de operación donde se generarán los principales problemas y poder relocalizar esfuerzos o reprogramar vuelos susceptibles de ser retrasados, tanto para una aerolínea como para el tráfico aéreo general.

25

A lo largo de la descripción y las reivindicaciones la palabra "comprende" y sus variantes no pretenden excluir otras características técnicas, aditivos, componentes o pasos. Para los expertos en la materia, otros objetos, ventajas y características de la invención se desprenderán en parte de la descripción y en parte de la práctica de la invención. Los siguientes ejemplos y dibujos se proporcionan a modo de ilustración, y no se pretende que restrinjan la presente invención. Además, la presente invención cubre todas las posibles combinaciones de realizaciones particulares y preferidas aquí indicadas.

35

### **Breve descripción de las figuras**

A continuación se pasa a describir de manera muy breve una serie de dibujos que ayudan a comprender mejor la invención y que se relacionan expresamente con una realización de dicha invención que se presenta como un ejemplo no limitativo de ésta.

- 5 FIG 1.- Muestra un diagrama esquemático que describe las fases principales que componen un vuelo. Desde el periodo en que la aeronave se encuentra volando, aterriza, aparca en la puerta y vuelve a despegar.
- FIG 2.- Representación simplificada de los clústeres en aeropuertos congestionados.
- FIG 3.- Muestra un diagrama descriptivo del subproceso de rotación de aeronave.
- 10 FIG 4.- Muestra un diagrama de la determinación de las posibles conexiones de vuelos de la misma flota dentro de una cierta ventaja de tiempo  $\Delta T$ .
- FIG 5.- Muestra un diagrama descriptivo del subproceso de vuelos en conexión.
- FIG 6.- Muestra un diagrama de flujo del método objeto de la presente invención.
- FIG 7.- Muestra el diagrama de flujo con el árbol de decisiones principales para permitir el
- 15 despegue de la aeronave.

### Exposición de un modo detallado de realización de la invención

De un modo detallado, en primer lugar es necesario sintetizar los parámetros necesarios para simular la propagación de retrasos en una red de tráfico aéreo. A continuación se muestra una tabla con dichas variables.

20

Símbolo	Parámetro
$\Delta T$	Ventana de tiempo para evaluar los potenciales vuelos en conexión, y sólo en caso de que no se cuente con las conexiones reales.
$T_s$	Tiempo mínimo de servicio para operaciones en tierra.
$\alpha$	Factor de conectividad para modular la incidencia de las conexiones en el modelo, en el caso de que no se cuente con las conexiones reales.
$\beta$	Factor para modular la capacidad de un aeropuerto para un cierto rango de tiempo.
$\rho$	Retraso inicial en caso de condiciones iniciales aleatorias.
$u$	Porcentaje de aviones inicialmente retrasados, en caso de condiciones iniciales aleatorias.
$\theta$	Umbral por encima del cual se considera un aeropuerto como

	congestionado.
<b>τ</b>	Umbral por debajo del cual se retrasa a un vuelo de acuerdo con una distribución gaussiana.
<b>μ</b>	Media de la distribución gaussiana.
<b>σ</b>	Desviación estándar de la distribución gaussiana.

En el método de la invención se ha de establecer una jerarquía de objetos para la simulación. Lógicamente, el avión (aeronave, lógicamente la invención no está limitada por el tipo de aeronave) es el agente fundamental de la simulación. Cada avión es único y se  
 5 identifica por su matrícula (*tail number*). Este código permite reconstruir el itinerario del avión durante el día. Esta secuencia, además, se puede subdividir en los vuelos individuales, que se consideran la unidad básica de programación.

Los vuelos individuales se definen como el conjunto mínimo de información que se utiliza  
 10 como insumo para trasladar una aeronave desde un origen a un aeropuerto de destino, cumpliendo con el calendario previsto. Durante su itinerario una aeronave puede estar en una de las dos fases de vuelo principal: *block-to-block (BtB)* o *turn-around (TAT)*. El primero se define como el tiempo transcurrido desde la puerta del aeropuerto de origen a la puerta del aeropuerto de destino. Esto incluye el tiempo de vuelo más el taxi – out y el taxi – in, es  
 15 decir, el carreteo en pista de despegue y aterrizaje. Por otro lado, el TAT se define como el tiempo en que la aeronave permanece aparcada en la puerta asignada (ver figura 1).

Como se ha indicado, cada vuelo se caracteriza por la matrícula de la aeronave, el aeropuerto de origen, el aeropuerto de destino, el horario de partida y el de arribo  
 20 programado. El BtB entre dos aeropuertos se calcula como:

$$T_b = T_{a.prog}^j - T_{p.prog}^i$$

Donde j corresponde al aeropuerto de destino, e i corresponde al de origen. Otro tema a tener en cuenta es que en el método de la invención no es posible absorber el retraso en la fase BtB, pero si en la fase TAT aprovechando la diferencia de tiempo entre el arribo real del vuelo y la salida programada del próximo.  
 25

La flota de una aerolínea es otro componente fundamental del modelo, pero en un nivel superior al de la aeronave. Cada aeronave es única, pero al ser parte de una flota, interactúa directamente a través de la conectividad entre vuelos con el resto de la flota.

El aeropuerto es una entidad de nivel intermedio, donde la interacción entre las aeronaves tiene lugar. Esta interacción se produce a través de los vuelos en conexión o, indirectamente, cuando el aeropuerto se congestiona, formándose una cola de espera de aviones para ser servidos. Cada aeropuerto es diferente a los demás por su capacidad programada y la agregación local de la programación de las distintas aerolíneas. Los aeropuertos son las entidades básicas que constituyen la red de tráfico aéreo.

Finalmente, el clúster es una entidad de alto nivel jerárquico que representa la interacción entre los aeropuertos. Los clústeres se encuentran formados por aeropuertos cuyo retraso promedio en la salida de los vuelos es superior a un cierto umbral  $\theta$ , y donde además todos se encuentran unidos por una conexión directa. El tamaño de un clúster se mide según la cantidad de aeropuertos que pertenecen al mismo. En la presente invención, para visualizar que es lo que ocurre en la red (esto es, el tráfico aéreo) se realiza un seguimiento del clúster de mayor tamaño.

Así pues, en la figura 2 se muestran dos clústeres (A y B), los cuales se encuentran formados por aeropuertos  $(1,1')$  cuyo promedio está por encima de  $\theta$  ( $1'$ ) y están conectados entre sí. En este caso concreto, el clúster A corresponde al de mayor tamaño de acuerdo con la cantidad de aeropuertos que lo constituyen.

Para establecer la simulación se han de tener en cuenta los subprocesos empleados. El primero de ellos es la rotación de una aeronave. Durante el transcurso de un día, cada aeronave debe cubrir un itinerario compuesto, en la gran mayoría, por más de un vuelo individual. Naturalmente, para completar un vuelo, los anteriores deben de haber sido completados. Además de esta situación, si un avión llega tarde y este retraso no puede ser absorbido durante el TAT, el siguiente vuelo partirá con retraso (ver figura 3).

Por norma general, se utiliza un tiempo de protección, pero a veces este tiempo no es suficiente. Otra característica de este subproceso es que durante el TAT la aeronave debe cumplir con un tiempo de servicio  $T_S$ . Este tiempo de servicio se encuentra relacionado con las operaciones en tierra que se realizan en la aeronave, tales como recarga de combustible, equipaje, mantenimiento, limpieza, carga y descarga, acciones que normalmente se denominan *handling*.

35



Además del potencial retraso por rotación, es posible que un vuelo se retrase debido a la necesidad de esperar a pasajeros en conexión y/o tripulación de otra aeronave de la misma flota que se encuentra retrasada.

Si no es posible obtener de la programación de la aerolínea las conexiones entre vuelos, el método objeto de la invención aproxima dichos datos definiendo, en primer lugar, una ventana de tiempo  $\Delta T$  anterior a la hora programada de partida del vuelo. En segundo lugar, dentro de dicha ventana, se deben distinguir las conexiones potenciales de vuelos de una misma flota del resto de compañías (ver figura 4, vuelos B y D). Finalmente, de estas posibles conexiones se seleccionan aleatoriamente aquellas con una probabilidad menor o igual a

$$\alpha * \text{conectividad promedio del aeropuerto}$$

La conectividad promedio del aeropuerto tiene en cuenta el porcentaje de pasajeros que hacen escala en el aeropuerto, a diferencia de aquellos que comienzan o finalizan el trayecto en el mismo. Por otro lado,  $\alpha$  es un parámetro que permite modificar la incidencia de las conexiones en el modelo.

Por ejemplo, en la figura 4 el vuelo D está seleccionado al azar. Por medio de este subproceso, el siguiente avión es capaz de despegar si y sólo si sus conexiones ya han arribado al aeropuerto. Si este no es el caso, el vuelo siguiente debe esperar hasta que se cumpla la condición anterior (ver figura 5). Es importante tener en cuenta que la conectividad entre vuelos es la única fuente de aleatoriedad en el modelo debido a una falta de información. Para vuelos en conexión no se considera un tiempo de transferencia de un avión a otro de la tripulación y/o los pasajeros.

Debido a que los aeropuertos son entidades que tienen capacidad finita, esto debe estar incluido en el modelo. Interacciones entre aeronaves distintas a las que se dan por medio de la programación (vuelos en conexión y rotación) se producen, en este caso, de forma indirecta a través de la cola de espera que se genera en el aeropuerto. Esto significa que retrasos de aviones de distintas aerolíneas pueden retrasar otras aeronaves que no pertenecen a la flota al congestionar el aeropuerto. En este caso, la propagación no es de uno a uno, como en los casos anteriores, se requiere un efecto agregado de varios aviones retrasados de forma que se perturbe la eficiencia del aeropuerto y, una vez cumplida esta condición, el retraso se propaga al resto de aeronaves que forman la cola. Se utiliza un

protocolo FIFS (primero en arribar, primero en ser servido) que es el tipo de protocolo de operaciones más extendido en la práctica y más simple de programar.

5 En las simulaciones, cada aeropuerto tendrá una capacidad que varía a lo largo del día de acuerdo a la tasa programada de llegadas del aeropuerto (*Programación Airport Arrival Rate, SAAR*). Esto significa que para cada aeropuerto se cuentan la cantidad de vuelos planificados por hora y ésta es la capacidad nominal del aeropuerto para cada hora del día. Debido a la concatenación de vuelos retrasados algunos aviones no podrían llegar a tiempo y la tasa real de llegadas al aeropuerto (*Real Airport Arrival Rate, RAAR*) variará. Cuando se  
10 cumple la condición  $RAAR > SAAR$  la cola comienza a formarse. Naturalmente, los aviones en tierra que no se encuentran en la cola están siendo servidos y este tiempo de servicios tiene una duración de  $T_s$  minutos. Cabe destacar que después de que una aeronave esté servida, esta operación no puede ser interrumpida por más que la SAAR varíe, de una hora a otra, por debajo del número de aeronaves que están siendo servidas.

15

Se define otro parámetro de control  $\beta$  con el fin de modificar la capacidad nominal de los aeropuertos. Este parámetro puede ser distinto dependiendo del aeropuerto. Por ejemplo, si se desea utilizar una capacidad de protección del 20% para un determinado aeropuerto, se ajusta el parámetro  $\beta$  de dicho aeropuerto en 1,2.

20

Gracias al parámetro  $\beta$  es posible modelar perturbaciones externas del sistema, como las condiciones atmosféricas adversas o los conflictos laborales. Estos eventos son introducidos en el sistema modificando  $\beta$  para la zona afectada y en un horario determinado. Por ejemplo, si una determinada zona geográfica es afectada por vientos fuertes en horas de la  
25 tarde se debe establecer qué aeropuertos se encuentran dentro de la zona de perturbación y disminuir  $\beta$  de acuerdo a la intensidad del fenómeno para las horas afectadas. Cada tipo de situación atmosférica adversa se le asigna un valor de  $\beta$  determinado.

Este valor de  $\beta$  depende de diversos factores, especialmente los climáticos, pero también  
30 están incluidos otros factores imprevisibles, como una huelga que afecte al aeropuerto, problemas técnicos, pistas cerradas, etc. Son factores que se encuentran directamente relacionados con la capacidad del mismo. Este valor también puede estar relacionado con las características operativas y la infraestructura en cada aeropuerto. A modo de ejemplo, el valor de  $\beta$  sería 1 con una capacidad normal, 0 con el aeropuerto cerrado y entre 0,75 y 0,5

para condiciones IFR (*Instrument Flight Rules*) con clima adverso, techo nuboso por debajo de los 1000 pies de altura y visibilidad menor a 3 millas náuticas.

5 Por medio de este subproceso se puede evaluar la robustez de la programación frente a diferentes eventos externos o, si el cometido es predecir la situación del tráfico aéreo para un día determinado, se puede introducir el pronóstico del tiempo, localmente, modificando dicho parámetro.

10 Otra fuente de retrasos primarios se agrupan dentro de los códigos de la IATA que comienzan con 4 y 5 (averías, retrasos y defectos en la aeronave y su mantenimiento). La forma de modelar los efectos de dichas causas imprevistas en el modelo es mediante el parámetro  $\tau$  de causa aleatoria. Para cada vuelo cuya probabilidad sea menor a  $\tau$  se lo retrasa siguiendo una distribución gaussiana de media  $\mu$  y desviación típica  $\sigma$ .

15 Las condiciones iniciales representan la situación del primer vuelo de cada aeronave. Dependiendo del propósito de la simulación se definen dos maneras de iniciar las simulaciones: condiciones iniciales reales y condiciones iniciales aleatorias.

20 Las condiciones iniciales reales replican con exactitud la situación inicial de los primeros vuelos de cada itinerario. Por medio de esta condición se busca, por ejemplo, pronosticar la programación de retrasos a partir de las primeras horas del día.

Por otro lado, cuando se inicializa el modelo con condiciones iniciales aleatorias, no es necesario tener datos en tiempo real sobre los primeros retrasos. Para realizar de este modo 25 las simulaciones es necesario fijar, a priori, dos parámetros: el retraso inicial  $\rho$  y el porcentaje de aviones inicialmente retrasados  $u$ . Por ejemplo:

- $\rho = 20$  minutos.
- $u = 20\%$ .

30 Esto significa que en dicho escenario, el 20% de los vuelos partirán con un retraso inicial de 20 minutos. Como la selección es aleatoria, el dónde y el cuándo sucederá el retraso inicial variará. Este parámetro se emplea para evaluar la robustez en la planificación de una aerolínea o un conjunto de aerolíneas.

### Ejemplo de implementación de la invención

35

En las figuras 6 y 7 se muestra en detalle cómo se ejecuta el método objeto de la invención. Así, el inicio del método implicar cargar los datos iniciales necesarios y los índices de vuelo, aeronave, origen y destino.

Los datos iniciales necesarios son aquellos relacionados con la programación (Programación) de una o varias aerolíneas. Como se indica a lo largo de la presente memoria la programación incluye:

- índice de aeronave (tail number)
- Origen
- Destino
- 10 - Horario programado de salida
- Horario programado de llegada

Luego, si se quiere analizar a priori una programación dada antes de implementarla se utilizan retrasos de salida aleatorios. En caso de que se esté utilizando las primeras horas del día para ver como se desarrollará la congestión en el resto del día se debe contar con los retrasos iniciales. En otras palabras, los vuelos retrasados de las primeras horas del día (generalmente las 4 primeras horas).

Además dependiendo de si se quiere o no introducir perturbaciones externas al modelo, se modifica localmente la variable  $\beta$  para los aeropuertos afectados localmente en una determinada franja horaria. En caso contrario, el parámetro  $\beta$  se fija en "1" para todos los aeropuertos de la red.

La siguiente etapa del método es generar los objetos de clase, una vez cargada la programación de una o varias aerolíneas en el objeto de clase *data*, los objetos de las clases restantes son creados utilizando esta estructura de datos. Estos objetos son los siguientes:

- Airport list: Indexación de todos los aeropuertos que se encuentran presentes en la programación para ese día.
- 30 - SAAR matrix: Incluye la capacidad de cada aeropuerto de la lista por hora.
- Airport flight connectivity factor: En el caso que no se cuenta con la información de conexión entre vuelos, se cuenta con un estimado del porcentaje de vuelos en conexión para cada aeropuerto.
- Adjacency list: Contiene la estructura de la red de tráfico aéreo para el día en
- 35 cuestión.

- Tail number: indexación de todas las matrículas de aeronave que operan ese día.
- Programación: para cada vuelo individual este objeto de clase contiene la información de retraso inicial, referencia del vuelo, estado del vuelo (en tierra L, en vuelo F y en servicio o en cola S), referencia de vuelo previo y las conexiones. Todos los vuelos son inicializado con L.
- Tail number situation: para cada aeronave contiene el aeropuerto de origen, el de destino, el BtB programado y real, así como el retraso en la salida (inicial, debió a llegada tarde, por cola de espera y por esperar conexiones).
- Airport tail number queue: para cada aeropuerto contiene los aviones ordenados según el protocolo FIFS.
- Airport flight queue: lo mismo que lo anterior pero indexado por medio de la referencia de vuelo.

Tras la generación de objetos de clase, se inicia el temporizador, se carga el Programación y se inicia el índice del Programación, estableciéndose si hay vuelos a completar o no. Para el caso negativo, se finaliza el proceso.

Si hay vuelos a completar, se establece si hay un tiempo de salida programado más un retraso inicial inferior o igual a la variable de tiempo preestablecida  $t$ . Hay que tener en cuenta que el retraso inicial es para el primer vuelo del itinerario exclusivamente. En caso negativo, se actualizan los objetos de clase &  $t+1$  minutos de forma síncrona para cada caso de tiempo. En caso positivo se actualizan índices y se interroga sobre el estado de la aeronave. Si se encuentra en BtB, se consulta si el BtB real es igual que el programado y, en caso afirmativo, el estado de vuelo se modifica de F a S y los objetos de cola de espera se actualizan. Si el BtB no es igual al programado, se establece como BtB real el BtB real más un minuto, y se modifica el índice de Programación como Programación + 1.

Es decir, que tras el vuelo inicial y para el resto de los vuelos, el retraso se va computando para cada paso de tiempo. Es decir, por ejemplo, en el tiempo  $t$  el avión no puede partir por la razón  $x$ . En  $t+1$  el retraso va a ser un minuto más (esto es, un paso de tiempo más). De esta forma, a cada paso de tiempo se interroga a la aeronave si puede partir, ya que de esta forma el tiempo de salida programado más el retraso es igual a  $t$ . Es una forma de que la consulta sea recurrente hasta que el avión esté habilitado para partir.

La llegada de la aeronave implica, como se ha indicado, que el estado de vuelo se modifica de F a S y los objetos de cola de espera se actualizan. Posteriormente se analiza si la probabilidad es inferior o igual a  $\tau$  y en caso afirmativo se modifica el retraso inicial del siguiente vuelo, donde el retraso por causa aleatoria es asignado al próximo vuelo de la aeronave, modificando su retraso inicial y modificando el índice de Programación como Programación + 1. Si por el contrario, la aeronave no está en BtB se actualizan los vuelos en conexión y se pasa directamente al algoritmo de toma de decisiones (figura 7).

El valor de  $\tau$  es aleatorio. Por ejemplo, podría ser 0,06 lo que indica que generalmente el 6% de los vuelos se retrasan por causas aleatorias. De manera aleatoria con una distribución uniforme entre 0 y 1 se obtiene un número N. Si N es menor que  $\tau$ , entonces el vuelo se retrasa por causa aleatoria. Una vez que sucede lo anterior el retraso en minutos se obtiene de una distribución gaussiana como fue explicado anteriormente. Esto se realiza una sola vez por vuelo y NO para cada t. En este caso si se modifica el retraso inicial asignado, independientemente de si es el primer vuelo del itinerario o no.

La toma de decisiones (figura 7) parte del establecimiento del estado del vuelo, que si es S (en cola) y el tiempo de servicio igual a 30 minutos (por ejemplo), se borra el vuelo del Programación y la aeronave del Airport Tail number queue, actualizando los datos de la tabla. Por el contrario, si no cumple la condición anterior, se analiza si la aeronave puede despegar. Si es que sí, es decir, si el tiempo de servicio  $T_s$  está completo y no existen conexiones a esperar, lógicamente despegar, siempre y cuando los vuelos individuales anteriores están completos.

El despegue implica que el tail number situation y el airport tail number queue correspondiente al origen son actualizados. Además, el tiempo BtB se resetea a cero y el estado de vuelo se modifica de L (tierra) a F (vuelo).

Si es que no se puede despegar se analiza si los vuelos individuales anteriores han sido completados o no. Para ello se verifica que la referencia de vuelo previo se encuentra entre la lista de conexiones a esperar y el estado del vuelo a L (tierra). Posteriormente, se verifica si la aeronave se encuentra en servicio, es decir, se inspecciona si el estado de vuelo es S y el tiempo de servicio es diferente de cero o la posición de la aeronave en la cola de espera del aeropuerto es menor que la capacidad del aeropuerto. Si la aeronave se encuentra en

servicio se modifican los índices estableciendo el retraso en la salida + 1 minuto y el tiempo de servicio + 1 minuto.

5 Si la aeronave no está en servicio, se establece si está o no en la cola de espera, es decir, que el estado sea S y el tiempo de servicio igual a cero. Si está en cola, se establece un retraso en la salida de más un minuto y un retraso por cola de más un minuto.

10 Si no está en cola, se interroga sobre las conexiones, de tal forma que se evalúe que el número de conexiones es distinto de cero y que el estado del vuelo es S. Si las conexiones han llegado se actualiza el retraso en la salida y el retraso por cola en un minuto. Si las conexiones no han llegado se actualiza el retraso en la salida y el retraso en la conexión con un minuto.

15 El clustering ocurre separado del anterior en el sentido de que para cada paso de tiempo, una vez completado los pasos anteriores –los subprocesos- se puede aplicar el algoritmo de clustering. También se puede aplicar al finalizar el día y realizar el agregado completo. Es un algoritmo para visualizar donde están concentrados los retrasos. Se puede separar completamente del subproceso de simulación descrito con anterioridad.

20 La gestión de los aeropuertos (subproceso de clúster) parte de crear una lista de clúster con todos los aeropuertos de la red etiquetados como -1, es decir, sin explorar. Posteriormente, se crea una lista vacía (lista activa) para incluir los aeropuertos a inspeccionar al atravesar la lista de adyacencia. Mientras existan aeropuertos inexplorados en la lista de clúster, y para cada aeropuerto de la lista:

- 25
- Comprobar si el aeropuerto está inexplorado y si el retraso promedio del aeropuerto es mayor a  $\theta$ .
  - Si es así, etiquetar el aeropuerto con su correspondiente índice en la lista de clúster e insertar dicho índice en la lista activa.
  - De lo contrario, etiquetar el aeropuerto como -2 (no retrasado).
- 30
- Mientras la lista activa continúe conteniendo aeropuertos a explorar:
    - o Para cada aeropuerto de la lista activa:
      - Explorar sus vecinos por medio de la lista de adyacencia.
      - Verificar si se encuentran etiquetados como inexplorados y si su retraso promedio es mayor a  $\theta$ .

- Si es así, etiquetar con el mismo índice anterior e insertar el nuevo índice del aeropuerto en la lista activa.
- De lo contrario, etiquetar el aeropuerto como “no retrasado”.
- Eliminar de la lista activa aquellos aeropuertos cuyos vecinos han sido explorados.

5



## REIVINDICACIONES

- 1 – Método para caracterizar la congestión aeroportuaria de una red de tráfico aéreo **caracterizado por que** comprende una primera etapa de generación de objetos de clase
- 5 obtenidos a partir de la información de programación diaria de al menos una aerolínea, basada dicha información en datos de la rotación de las aeronaves, de los tiempos programados de salida y llegada de los vuelos, de los vuelos en conexión, de la congestión aeroportuaria y/o de los retrasos asociados a dicha aerolínea; y donde dichos objetos de clase comprenden, al menos,
- 10 a) un objeto de clase con la indexación de todos los aeropuertos que se encuentran presentes en la programación para ese día;
- b) un objeto de clase con el horario programado de salida y llegada de los vuelos;
- c) un objeto de clase con los aeropuertos de origen y destino de cada vuelo;
- d) un objeto de clase con la indexación de las matrículas de las aeronaves que operan
- 15 ese día para seguir su rotación;
- e) un objeto de clase con el código de aerolínea que identifique el operador de cada vuelo;
- f) un objeto de clase con el estado del vuelo: en tierra L, en vuelo F y en servicio o en cola S, referencia de vuelo previo y las conexiones para cada vuelo individual;
- 20 g) un objeto de clase con la información de retraso inicial de cada vuelo;
- h) un objeto de clase para cada aeropuerto que contiene información sobre la ordenación de colas de espera de los vuelos;
- i) un objeto de clase donde para cada aeronave se describe el aeropuerto de origen, el de destino, el BtB programado, así como el retraso en la salida: inicial, debido a
- 25 llegada tarde, por cola de espera y/o por esperar conexiones;
- y una segunda etapa que comprende la inicialización de un temporizador y de las indexaciones asociadas a la programación, estableciéndose si hay vuelos a completar o no, de tal forma que
- si no hay vuelos a completar se finaliza la etapa;
- 30 - y si hay vuelos completar se establece si hay un tiempo de salida programado más un retraso inicial inferior o igual a una variable de tiempo preestablecida t; donde:
- o en caso negativo, se actualizan los objetos de clase a t+1 minutos de forma síncrona para cada caso de tiempo;
  - o y en caso positivo se actualizan las indexaciones y se interroga sobre el
- 35 estado de la aeronave:

- si se encuentra en estado BtB, se consulta si el BtB real es igual que el programado y, en caso afirmativo, el estado de vuelo se modifica de vuelo a cola y los objetos de cola de espera se actualizan;
- si el BtB no es igual al programado, se establece como BtB real el BtB real más un minuto, y se modifica la indexación de programación como programación + 1.

2 - Método de acuerdo con la reivindicación 1 que comprende, además, la generación de uno o más de los siguientes objetos de clase:

- 10 j) un objeto de clase con información sobre la capacidad de cada aeropuerto de la lista por hora;
- k) un objeto de clase con la información de conexión entre vuelos o un estimado del porcentaje de vuelos en conexión para cada aeropuerto;
- 15 l) un objeto de clase con información sobre la estructura de la red de tráfico aéreo para el día en cuestión;
- m) un objeto de clase con información acerca de perturbaciones externas provenientes de datos meteorológicos, geológicos, de conflictos laborales, o de escenarios simulados;
- n) un objeto de clase con información sobre vuelos cancelados o desviados de su ruta;
- 20 o) un objeto de clase con información sobre las trayectorias de los vuelos;
- p) un objeto de clase con información sobre la congestión de los sectores aéreos;
- q) un objeto de clase que comprende, para cada aeropuerto, la indexación de los aviones ordenados según el protocolo FIFO; y un objeto de clase como el anterior, pero indexado por medio de la referencia de vuelo.

25 3 – Método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1-2, que comprende información de retrasos aleatorios en los vuelos, donde se define un umbral o fracción  $\tau$  de vuelos retrasados y se realiza una extracción de un número aleatorio para cada vuelo donde, si dicho número aleatorio es menor que  $\tau$ , se le asigna al vuelo un retraso fijo o derivado de una distribución de probabilidad.

4 – Método de acuerdo con la reivindicación 3 donde, si la aeronave no está en estado BtB, se lleva a cabo un proceso de toma de decisiones que comprende un establecimiento del estado del vuelo en que:

- si la aeronave está en cola y el tiempo de servicio igual a periodo determinado, se actualizan los datos;
- si no cumple la condición anterior, se analiza si la aeronave puede despegar donde:
  - o en caso afirmativo, es decir, si el tiempo de servicio  $T_s$  está completo y no existen conexiones a esperar, se autoriza el despegue, siempre y cuando los vuelos individuales anteriores estén completos, actualizando los datos relacionados con dicha aeronave, el tiempo BtB se resetea a cero y el estado de vuelo se modifica a en vuelo;
  - o en caso negativo, se analiza si los vuelos individuales anteriores han sido completados o no; y donde para ello en primer lugar se verifica que la referencia de vuelo previo se encuentra entre la lista de conexiones a esperar y el estado del vuelo en tierra, y en segundo lugar se verifica si el estado de vuelo es en cola y el tiempo de servicio es diferente de cero, o la posición de la aeronave en la cola de espera del aeropuerto es menor que la capacidad del aeropuerto; y donde:
    - si la aeronave se encuentra en servicio se modifican los índices estableciendo el retraso en la salida + 1 minuto y el tiempo de servicio + 1 minuto;
    - si la aeronave no está en servicio, se establece si está o no en la cola de espera; y donde si está en cola, se establece un retraso en la salida de más un minuto y un retraso por cola de más un minuto; y donde si no está en cola, se interroga sobre las conexiones, de tal forma que se evalúe que el número de conexiones es distinto de cero y que el estado del vuelo es en cola; si las conexiones han llegado se actualiza el retraso en la salida y el retraso por cola en un minuto; si las conexiones no han llegado se actualiza el retraso en la salida y el retraso en la conexión con un minuto.

5 – Método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1-2 que comprende la creación de una lista de clúster con todos los aeropuertos de la red etiquetados como sin explorar; y donde posteriormente, se crea una lista activa para incluir los aeropuertos a inspeccionar al atravesar una lista de adyacencia; y donde mientras existan aeropuertos inexplorados en la lista de clúster, y para cada aeropuerto de la lista, se realizan los siguientes pasos:

- comprobar si el aeropuerto está inexplorado y si el retraso promedio del aeropuerto es mayor a un umbral de tiempo  $\theta$  por encima del cual se considera un aeropuerto como congestionado;
- 5 - si es así, etiquetar el aeropuerto con su correspondiente índice en la lista de clúster e insertar dicho índice en la lista activa;
- de lo contrario, etiquetar el aeropuerto como no retrasado;
- mientras la lista activa continúe conteniendo aeropuertos a explorar:
  - o para cada aeropuerto de la lista activa, se realizan los siguientes pasos:
    - 10     ▪ explorar sus vecinos por medio de la lista de adyacencia;
    - verificar si se encuentran etiquetados como inexplorados y si su retraso promedio es mayor a  $\theta$ ;
    - si es así, etiquetar con el mismo índice anterior e insertar el nuevo índice del aeropuerto en la lista activa;
    - de lo contrario, etiquetar el aeropuerto como no retrasado;
- 15 - y finalmente eliminar de la lista activa aquellos aeropuertos cuyos vecinos han sido explorados.

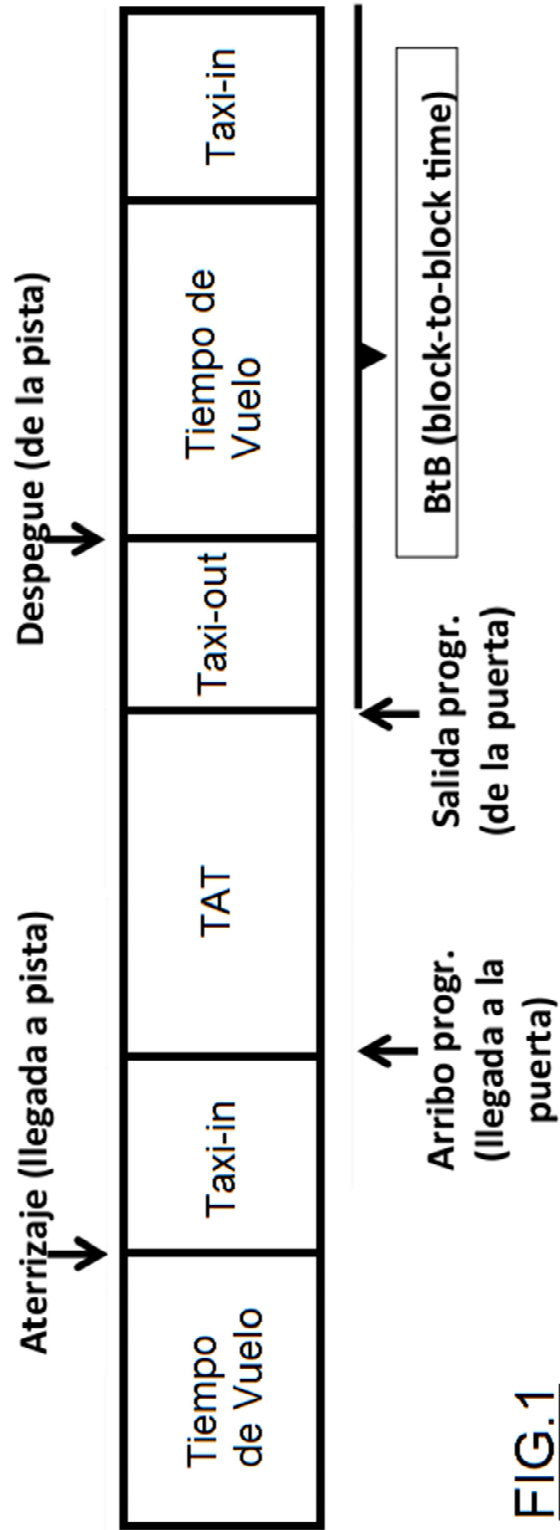


FIG.1

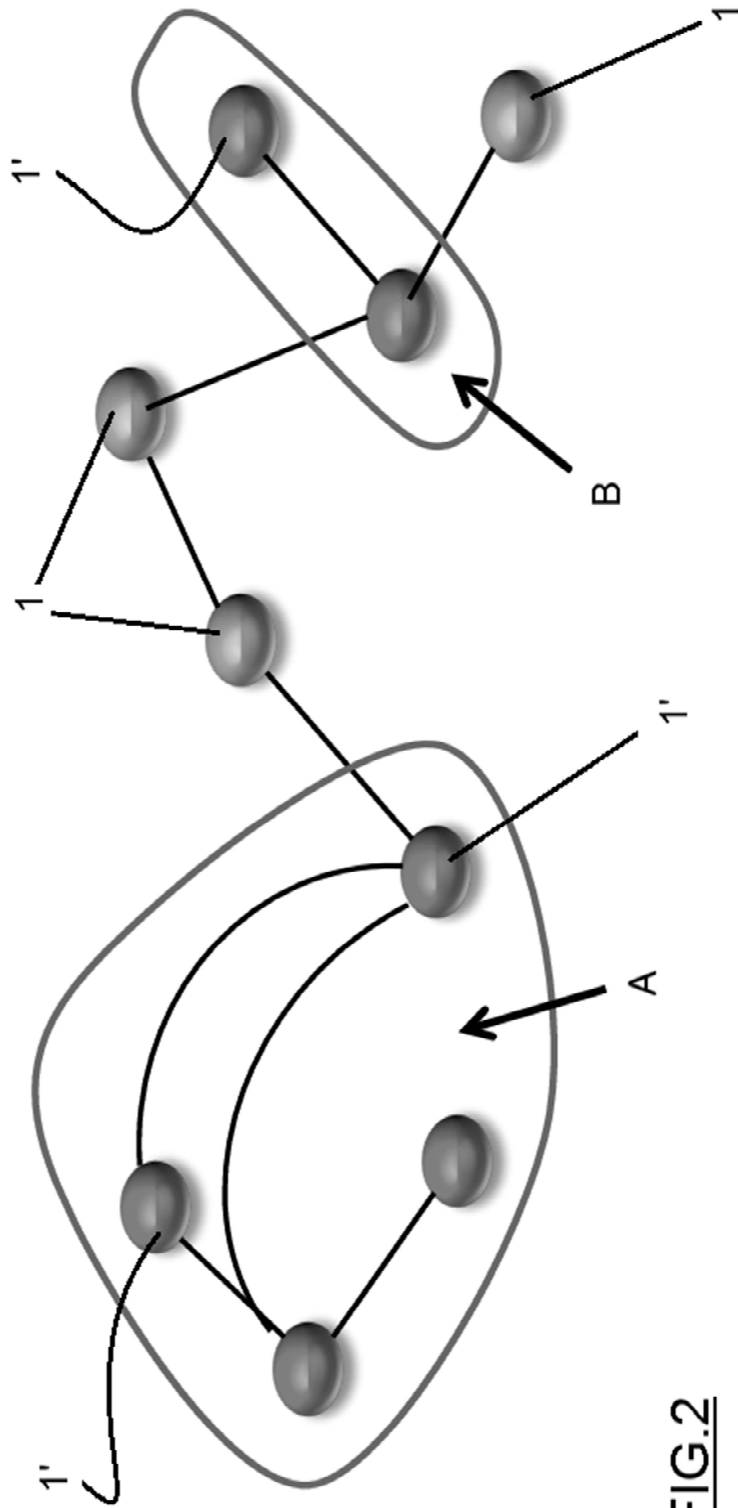


FIG.2

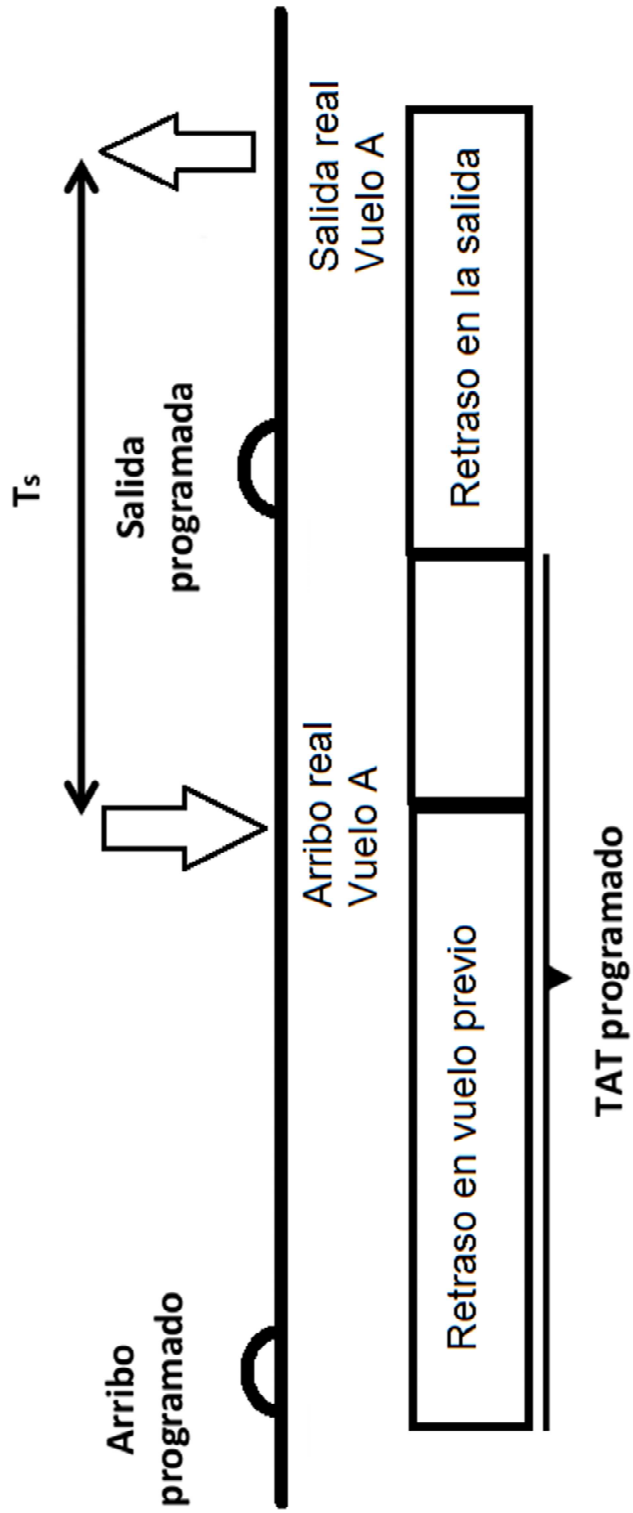


FIG.3

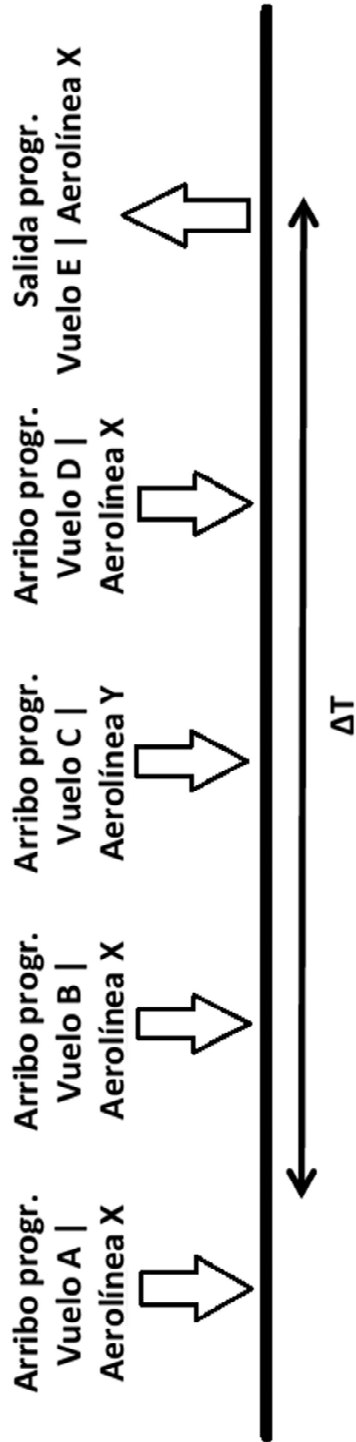


FIG.4



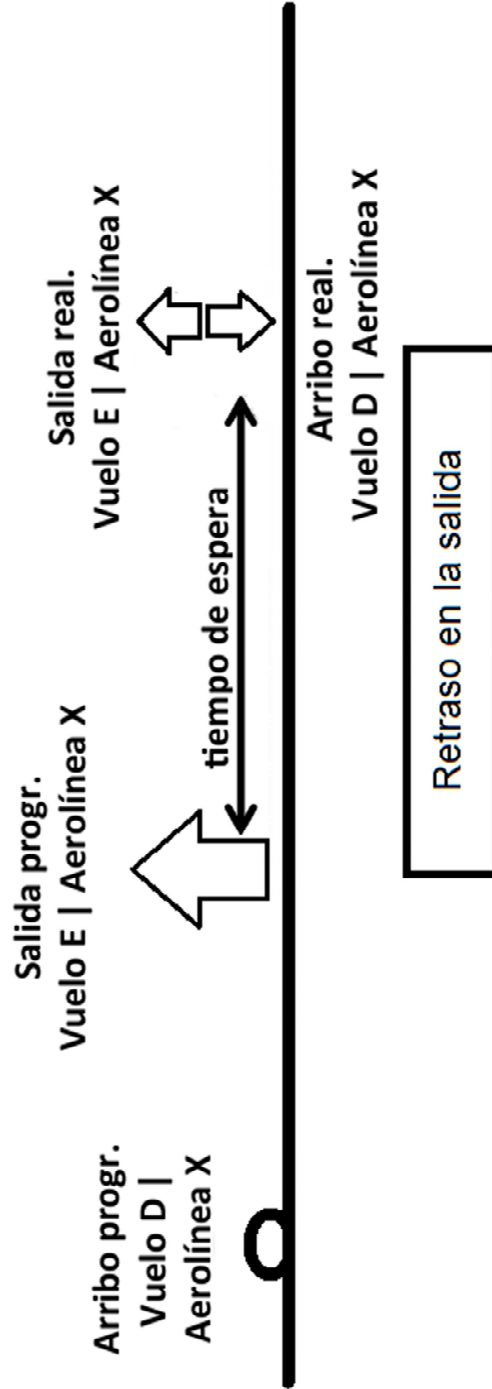


FIG.5

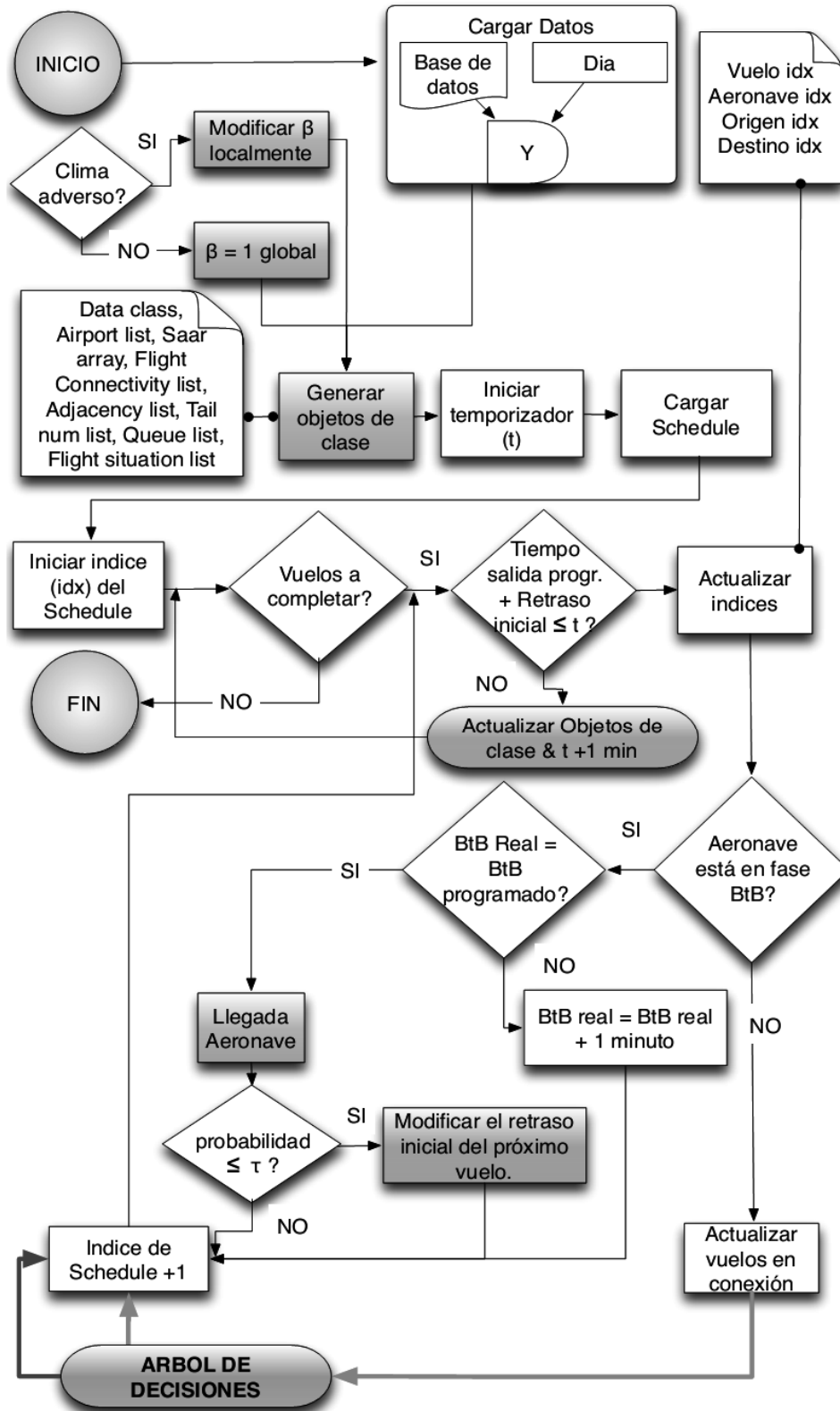


FIG.6

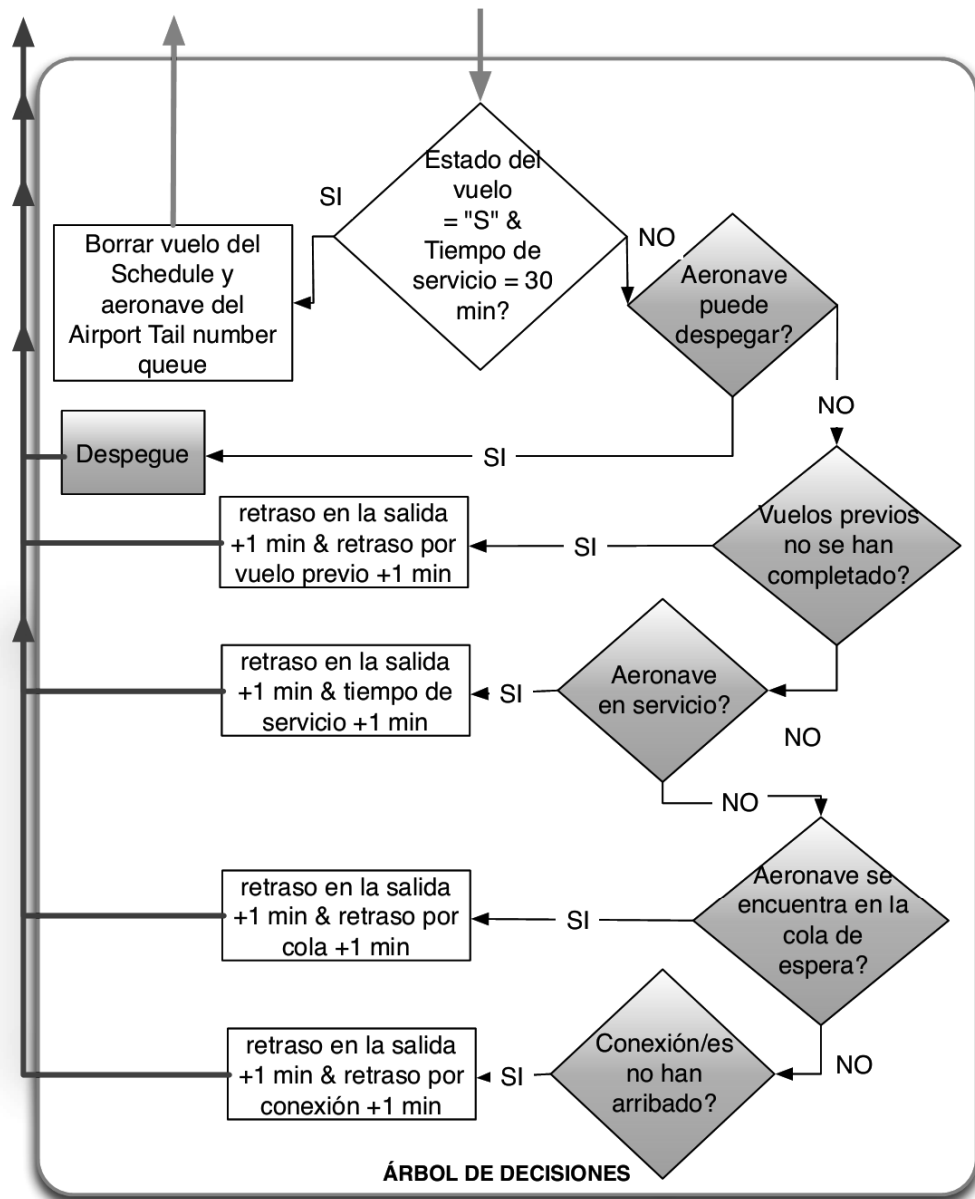


FIG.7