

Revisión de modelos de optimización en la logística aeroportuaria

Review in optimization models in the airport logistics

Andrea Carolina Castellanos Muñoz¹ Javier Arias Osorio²

¹ Ing. Industrial Universidad Industrial de Santander, AndreacastellanosM@yahoo.com

² Magister en Administración Universidad Industrial de Santander, jearias@uis.edu.co

Recibido: Mayo 26 de 2016 - Aceptado: Julio 11 de 2016

<http://dx.doi.org/10.18566/puente.v10n2.a02>

Resumen— En este artículo presenta una revisión De los modelos de optimización en logística aeroportuaria, describiendo los principales modelos existentes, sus características propias del contexto funcional, su aplicabilidad desde el punto de vista de diversos autores, y su aplicación en el ámbito latinoamericano.

Palabras Claves— Logística, aeroportuaria, flujo aéreo, modelos de optimización, heurísticas.

Abstract— This paper presents a review of optimization models in airport logistics, describing the main existent models, their characteristics typical of a functional context, their applicability from the point of view of various authors, and their application in the Latin-American setting.

Keywords— Airport logistics, Air flow, Optimization Models, Heuristics.

I. INTRODUCCIÓN

En la logística aeroportuaria pueden mencionarse varios elementos que han llevado a hacer de ésta un área de gran importancia en las últimas décadas. Los aeropuertos han dejado de ser exclusivamente reguladores de tráfico aéreo, y se han convertido en centros de actividad en sí mismos, es decir, en nuevos polos de desarrollo regional con condiciones de ciudades pequeñas al interior de ellos. El crecimiento que presenta la industria aérea, obedece entre otras cosas, a su planificación en general, al esfuerzo comercial para lograr ser competitivos, a la disminución de tarifas, al incremento de frecuencias, al aumento de trayectos directos, etc; lo que da lugar a que se produzcan cambios en cuanto a calidad de vida (mejor gestión de tiempo y relación costo-beneficio) y la calidad en los servicios adquiridos.

En la toma de decisiones a nivel táctico, el modelamiento matemático propio del área de optimización intrínseca a la Investigación de operaciones (I.O), es una herramienta cuantitativa ampliamente utilizada para obtener soluciones óptimas de problemas complejos a través de modelos concretos.

Como se podrá advertir, los modelos y las técnicas de optimización ofrecen una serie de opciones que son muy valiosas para cualquier tipo de planeación que pretenda llegar a resultados óptimos o cercanos a ello. Aplicados a la logística

aeroportuaria, estos permiten obtener buenas decisiones (en función de costos, tiempos o niveles de servicio) que involucran desde determinar las rutas que son mejores para volar, pasando por el número de empleados que se deben contratar para determinada actividad, el tipo de equipo que es adecuado adquirir, el repertorio de tarifas que se pueden ofrecer, etc.

Así, indagar y analizar cómo utilizar los modelos de optimización en el ámbito de la logística aeroportuaria es el objetivo de esta investigación. Dicho análisis se concentra en la ventana de tiempo de documentos publicados en revistas científicas, del año 1998 en adelante.

II. METODOLOGÍA

El desarrollo de la investigación se aborda como un proceso documental mixto (cualitativo-cuantitativo) que emplea diferentes métodos de búsqueda, análisis, valoración y validación de la información. Ver figura 1.



Fig 1. Metodología del proyecto

A continuación, en el apartado tres se muestra una identificación del contexto de la logística aeroportuaria para en el apartado cuatro presentar los resultados de la revisión.

III. LOGÍSTICA AEROPORTUARIA

El sistema de transporte aéreo (ATS) no sólo es enorme y complejo; también involucra a muchos actores con diferentes y a veces contradictorios objetivos, que hace que sea difícil alcanzar una gestión global del flujo. La toma de decisiones en colaboración (CDM) es una iniciativa que intenta crear un terreno común para estos actores. En definitiva, el objetivo es mejorar la integración entre el aeropuerto, la compañía aérea y la planificación de la gestión del flujo de tráfico aéreo para permitir la colaboración de toma de decisiones a través de un mejor uso de intercambio de información en tiempo real.

La logística aeroportuaria, se encarga de la gestión de recursos en el sistema aeroportuario y cubre todas las actividades logísticas y subprocesos (y los recursos correspondientes) que están involucrados e influyen en el transporte aéreo [32].

Lo que se espera con una buena logística aeroportuaria, es desarrollar una visión completa de todos los procesos y actividades en el aeropuerto; en particular, una visión en tiempo real y una capacidad de control sobre todos los recursos en uso, o que están disponibles para el apoyo a la ATS. Con esta información a mano, sería posible, en una base táctica, optimizar la planificación y la utilización de todos los recursos, y, a nivel operativo, poder reaccionar a tiempo debido a los diferentes problemas que se puedan generar.

La gestión de los recursos en el ATS no es nada nuevo e incluye muchas áreas de investigación bien conocidas, como lo son: líneas aéreas, aeropuertos y control del tráfico aéreo. En este contexto, un TC (controlador de tráfico) representa a todos los actores responsables de la gestión del tráfico aéreo (ATM), aunque esto es una simplificación, pues es evidente, que algunas tareas de planificación tienen que llevarse a cabo en forma conjunta por más de un actor.

La logística de aeropuertos tiene por objeto capturar la interacción entre los procesos, y lo que es más importante, entre los procesos de aeropuertos y ATM.

Además de las operaciones de las líneas aéreas y aeropuertos, la gestión de recursos es igualmente importante en la ATM. En el contexto de la logística de aeropuertos, la operación más relevante de la ATM, incluyendo las medidas de re-enrutamiento, la espera en el aire y la espera en tierra.

Con lo anterior, y teniendo claro el actuar y el funcionamiento de la logística aeroportuaria, se espera que con el aumento significativo de vuelos (por ejemplo, en el caso de Latinoamérica), los aeropuertos y las aerolíneas, se enfoquen en encontrar la forma de que sus operaciones diarias sean más

eficaces, ya que los métodos existen y lo que queda es seguir aplicándolos [33].

IV. MODELOS DE OPTIMIZACIÓN EN LA LOGÍSTICA AEROPORTUARIA

A continuación, se presentan los modelos de optimización en la logística aeroportuaria más relevantes encontrados en la literatura. Los modelos aquí expuestos tratan de temas principales como: tráfico aéreo, asignación de tiempo a las aeronaves para el despegue, rodaje de aviones, movimiento en tierra de aeronaves, espera en el aire, entre otros.

A. Gestión del flujo de tráfico aéreo.

La gestión del flujo del tráfico aéreo tiene que lidiar tanto con las limitaciones de capacidad de las rutas en el espacio aéreo como en las otras limitaciones de capacidad más habituales en los aeropuertos.

Se deben considerar limitaciones de aeropuerto y del sector en ruta, y la asignación de retrasos a vuelos tanto en tierra como en aire.

Existe un modelo de optimización determinístico para el problema de gestión con el flujo de tráfico aéreo europeo (EU ATFM, por sus siglas en inglés). [1]

El modelo diseña estrategias de gestión de flujo que involucra tanto espera en tierra como en el aire. Se muestra en particular, que en ciertas circunstancias, es mejor en términos de la demora total y costos del retraso, asignar a un vuelo un retraso en la espera aérea así sea más costoso que si se asigna un retraso en tierra.

El modelo descrito está diseñado para resaltar los aspectos estratégicos del problema EU ATFM, evitando detalles excesivos y características de segundo orden. Y considera los siguientes elementos iniciales relevantes: 1. Periodos de tiempos discretos, 2. Demanda determinística (el horario de llegada de los vuelos a todos los aeropuertos destino, son conocidos), 3. Capacidad determinística (la capacidad tanto del aeropuerto como del sector son conocidas para cada periodo de tiempo t), 4. Ubicación del retraso en el aire, 5. Velocidad de viaje igual, 6. Sin cambio de ruta, 7. Capacidad del sector.

El primer supuesto es típico de casi todos los modelos de ATFM y está de acuerdo con la práctica. Los supuestos 2 y 3 tienen lugar en la categoría "determinista". Los supuestos 4-7, como un grupo, simplifican en gran medida el modelo, haciendo innecesario el seguimiento de aeronaves individuales (o tipos de aviones) o el considerar las distancias entre elementos de la red. [2]

Sin embargo, de los supuestos 1-7, sólo dos variables de control están asociadas a cada vuelo: la cantidad atribuida de

demora en tierra antes del despegue en el aeropuerto de origen y la cantidad de retardo en el aire asignado para ser tomado en el espacio aéreo cerca del aeropuerto de destino. [3]

El modelo desarrollado en 1998, se caracteriza por el uso de un conjunto alternativo de variables de decisión que conducen a soluciones rápidas de los programas enteros resultantes. Mediante la adopción de un bajo nivel de detalle y una formulación sencilla, el modelo EU ATFM está en mejores condiciones para destacar las características críticas que podrían resultar más importantes en la práctica del entorno geográfico definido. [4]

Sin embargo, en el 2000, se extiende el modelo para cubrir la posibilidad que las rutas de vuelo pudieran variar de según el nivel de congestión en el sistema. El espacio de decisión en este caso se convierte en uno mucho más grande, de modo que las variables agregadas y métodos aproximados se deben emplear para resolver problemas de tamaño real. [5]

Este modelo se validó en cuatro configuraciones de red genérica para demostrar las siguientes características importantes de solución al problema EU ATFM:

- Las soluciones involucran combinaciones complejas de espera aérea y terrestre.
- En muchos casos, el retraso total o el costo del retraso total puede ser reducido significativamente al asignar retrasos en la espera aérea a ciertos vuelos en vez de retrasos en tierra, a pesar de que estos últimos son menos costosos por unidad de tiempo.
- Como resultado de su estructura de red, el problema UE ATFM da lugar a conflictos fundamentales entre soluciones eficientes (en el sentido de minimizar alguna función de los costos totales de retraso), y equitativas (en el sentido de manejar usuarios de la red en un orden FSFS, u otra disciplina prioridad similar, con respecto al acceso a los recursos). A pesar de que el modelo de la UE ATFM está diseñado para distribuir los costos de retraso de manera uniforme entre los usuarios con similares características (por ejemplo, los vuelos que viajan entre los mismos dos aeropuertos en rutas idénticas), las soluciones eficientes pueden discriminar sistemáticamente, por ejemplo, los aviones que viajan en ciertas rutas, procedente de o que terminan en ciertos aeropuertos, o vuelan en determinados momentos.

B. Optimización del flujo de tráfico aéreo

Este modelo provee una representación completa de las fases de cada vuelo, como por ejemplo: la fase de despegue, proceso de vuelo y aterrizaje. Sugiriendo que cada una de las acciones es implementada para alcanzar la meta de seguridad, eficiencia y movimiento rápido de la aeronave. El rasgo distintivo del modelo es que permite tomar decisiones del cambio de ruta (A diferencia del modelo mostrado en el numeral 4.1) Estas decisiones son formuladas por medio de condiciones locales las cuales permiten

representar tales decisiones de un modo muy compacto sólo introduciendo nuevas restricciones.

Quienes fueron los primeros en formalizar este problema, una gran cantidad de modelos y algoritmos han sido desarrollados para detectar las estrategias óptimas de asignación de retrasos terrestres para los vuelos Sin embargo se ha hecho cada vez más evidente que retrasos muy significativos y degradaciones a través del sistema han surgido por problemas de rutas y limitaciones del espacio aéreo. [15]

Una de las implicaciones de la presencia simultánea de las restricciones aeroportuarias y de rutas en el espacio aéreo es que la elaboración de buenas estrategias es una tarea bastante complicada.

Cualquier modelo matemático desarrollado para este propósito tiene que considerar la verdadera cadena de elementos capacitados, sectores de ruta y aeropuertos [16], además está disponible un conjunto más grande de opciones para resolver la congestión: esperas terrestres, esperas aéreas, filas de millas y cambios de ruta, es decir la posibilidad de cambiar la ruta de un vuelo a una opción distinta si la primera ruta se encuentra en una región que se congestiona inesperadamente.

Una una solución desagregada determinística entera 0-1 fue formulada programando modelos para las decisiones de espera terrestre o aérea, de vuelos individuales en presencia de ambas restricciones de capacidades para el aeropuerto y el espacio aéreo. [17]

También se presenta un programa entero determinístico de 0-1 para resolver un problema similar [18]. El modelo decide la hora de partida y el tiempo de sector de ocupación para cada aeronave. El modelo posibilita una muy eficiente computación de soluciones óptimas, pues muchas de las restricciones proveen aspectos del casco convexo de las soluciones. No obstante este modelo tal como los citados anteriormente no considera el cambio de rutas como una opción. Se asume que el sendero de vuelo es conocido en avance y está arreglado.

Modelar las decisiones de cambio de ruta ha planteado uno de los más grandes desafíos en este campo de investigación. La meta es combinar la flexibilidad del modelo en términos de rango de decisiones del modelo presentado por Bertsimas et al [19] con las propiedades matemáticas mostradas del modelo presentado por ellos mismos años atrás [20], para resolver eficientemente problemas considerables.

A raíz de lo anterior, diseñaron un nuevo modelo para el manejo de flujo de tráfico aéreo que incluye todas las opciones posibles para resolver la congestión aérea incluyendo el cambio de rutas. El alcance del modelo es sugerir la hora de salida, la ruta, el tiempo requerido para cruzar a cada sector y la hora del arribo teniendo en cuenta la capacidad de todos los sectores y aeropuertos. [21]

La principal característica del modelo es la formulación de decisiones de cambios de rutas en un modo muy compacto. Con respecto a los modelos previos, la nueva metodología no requiere ninguna variable adicional pero si introduce nuevas restricciones. Dichas restricciones implementan condiciones locales de rutas que son suficientes para el propósito del modelo.

El modelo matemático intenta determinar cómo ajustar el tiempo de liberación de cada vuelo dentro del sistema (hora de salida), cómo controlar la velocidad del vuelo una vez en el aire y cómo proceder para el cambio de ruta en caso de que se presenten congestiones en la ruta preferida.

Considerando el modelo propuesto por [20], cualquier ruta de origen-destino es representada como una secuencia de sectores sobrevolados por una aeronave en los modelos de manejo del flujo del tráfico aéreo que no se incluye el cambio de ruta como una opción, la secuencia de sectores a ser volados es predeterminada. Para contemplar el cambio de rutas en el modelo matemático, el conjunto de posibles sectores que pueden ser volados debe ser prolongado.

El conjunto de posibles rutas entre origen-destino corresponde al set de cadenas máximas del conjunto parcialmente ordenado. Para imponer que cada vuelo siga exactamente una ruta, se determinaron condiciones locales que simplemente declararon lo siguiente:

- Para volar un sector, cualquier aeronave tendrá primero que volar un sector anterior por lo menos un número de periodos de tiempo igual al tiempo de su sector de vuelo o equivalentemente.
- Si una aeronave está volando un sector, por lo menos un número de periodos de tiempo igual al tiempo de su vuelo, entonces inmediatamente después volará solamente uno de los sectores subsecuentes.

Así mismo, para garantizar la equidad entre los vuelos, dentro de la función objetivo que se diseñó para este modelo, se incluye en el costo de la función objetivo algunos coeficientes que son una función de tardanza de un vuelo (este valor es cercano a cero).

Esto favorece la asignación de una cantidad moderada de retardo total a cada uno de dos vuelos en lugar de la asignación de una pequeña cantidad a uno y una gran cantidad a la otra.

Las restricciones consideradas fueron:

- El número de vuelos que pueden despegar del aeropuerto k en el tiempo t , no excederá la capacidad de salida de aeropuerto k en el tiempo t .
- El número de vuelos que pueden llegar al aeropuerto de k en el tiempo t , no excederá la capacidad de llegada del aeropuerto de k en el tiempo t .

- La suma de todos los vuelos que pueden ser factibles en el sector j en el tiempo t no excederá la capacidad del sector j en el tiempo t .
- Un vuelo no puede entrar en el siguiente sector, hasta que haya pasado el mínimo tiempo posible, mientras viajan a través de uno de los sectores anteriores en su curso actual.
- El vuelo debe llegar a su destino.
- Conectividad entre los aeropuertos. En este caso es cuando un vuelo debe continuar su viaje; es decir el avión en salida tiene un vuelo posterior dentro de algún intervalo de tiempo.

Uno de los elementos clave de este modelo, fue el conjunto S_f (representa el conjunto de elementos capacitados de espacio aéreo, por ejemplo aeropuertos y sectores), de sectores que pueden ser volado por un vuelo f . Por defecto, todo el sector de la ruta más corta desde de vuelo f están incluidos en S_f . Si uno o más de los sectores en la ruta más corta está congestionada, los sectores adicionales, los contiguos, se incluyen en el conjunto de S_f . Para este propósito, los sectores se consideran congestionados si su demanda supera el 80% de la capacidad. El número de horquillas en origen-destino da una estimación más baja del número de posibles rutas entre el origen y el destino. En promedio, el número de horquillas es de aproximadamente 3, lo que significa que, en promedio, hay al menos 3 rutas entre cada par origen-destino, a pesar de que puede ser mucho más grande.

C. Optimización de la colaboración para el rodaje en tierra basado en la prioridad de las aeronaves.

El problema aborda este apartado es el que la mayoría de las aerolíneas y prestadoras de servicios de tránsito aéreo hacen la planificación de sus vuelos (salida y llegada) asumiendo buenas condiciones climáticas, pues suponen que las tasas de llegada y salida disponibles no se limitarán por cualquier motivo que no sea las limitaciones de la pista o de seguridad.

Además de la planificación ajustada, la naturaleza puesta en cola de las operaciones de superficie implica que hay suficientes aviones para asegurar un depósito de la demanda de despegue constante en la pista.

Para hacer frente a la congestión, la FAA (Federal Aviation Administration), los aeropuertos y las compañías aéreas tienen varias opciones:

- 1) *Pueden tratar de eliminar la congestión a través de:*
 - a. Aumento físico de su capacidad (construcción de más pistas de aterrizaje, o mediante el uso de tecnología de radar para vigilar wake-vortex y reducir las restricciones de separación de la aeronave).

- b. Realizar las planificaciones de la salida, de acuerdo a las restricciones de espacio.

2) *También se pueden optimizar las operaciones a través de:*

- a. Centralización de las operaciones en torno a las autoridades aeroportuarias para facilitar la colaboración, optimizar el rendimiento y reducir las ineficacias.
- b. El uso de la toma de decisiones en colaboración (CDM) para mejorar las operaciones, respetando el entorno competitivo.

Sin embargo, la solución 1a) donde se indica el aumento de capacidad de los aeropuertos, no siempre es aplicable [7]. Pues la demanda de tráfico se mantendría alta y la congestión se reduciría, pero no quedaría suprimida.

Para el caso de aplicar la solución 1b), las restricciones de espacio no evitan las interrupciones no planificadas de rendimiento provocados por eventos tales como cambios frecuentes en la dirección del viento (que empujan a la torre de control del aeropuerto para cambiar de configuración varias veces durante un corto período de tiempo), programas de demoras en tierra, o simplemente cierres debido al mal tiempo.

El punto 2a), que señala la centralización de las operaciones en torno a las autoridades aeroportuarias para facilitar la colaboración, da mucho poder a las autoridades de los aeropuertos y los proveedores de servicios de tránsito aéreo. Esta solución está lejos de las operaciones habituales en los aeropuertos, sobre todo los aeropuertos de los Estados Unidos que tienen operaciones muy descentralizados, [8].

Por su parte, el punto 2b) con el uso de CDM puede ayudar al aeropuerto para llegar a una solución intermedia, que no va a centralizar las operaciones. Este segmento estudia los beneficios potenciales de CDM aplicados a las operaciones en tierra durante las situaciones de congestión. CDM ya ha demostrado su eficacia en la gestión del flujo con la salida de los horarios de vuelo (FSM), [9], quien también añade que el FSM, es de vital importancia, pues permite a las aerolíneas reprogramar sus “vuelos colaboración” para adaptar la demanda de la llegada a su capacidad de llegada en el aeropuerto. El entorno competitivo juega un papel importante.

Por su parte, plantean que para gestionar la congestión, cualquier esquema de optimización de funcionamiento descentralizado primero tiene que encontrar una solución que ofrezca a las aerolíneas motivación para no apilar sus aviones en una pista de aterrizaje. Esto podría lograrse mediante la motivación a las aerolíneas para que mantengan los aviones en la puerta o mediante el uso de estacionamientos adicionales para parquear aviones mientras el sistema de salida está saturado. [10]

El mayor desafío que enfrenta mantener los aviones que están en cola en la calle de rodaje está dado por los requisitos de disponibilidad de espacio para los recién llegados (en la puerta o en la calle de rodaje). Sin embargo, en la mayoría de los aeropuertos, hay dos fenómenos que garantizan que la capacidad de aparcamiento pudiera ser explotada. En primer lugar, la ocupación de la puerta y el estacionamiento son cíclicas, todos los días hay un momento en que la tasa de llegada es inferior a la tasa de salida, esto crea la capacidad temporal que podría ser utilizado para mantener aviones en pista. En segundo lugar, la capacidad de los aeropuertos crece cíclicamente, cuando se construyen rampas, o la calle de rodaje se prolonga. El aumento repentino de la capacidad de estacionamiento permite más capacidad de retención, especialmente porque la tasa de salida máxima se mantiene sin cambios hasta que se construye una nueva pista de aterrizaje. La congestión siempre va a suceder, sin embargo los conceptos de CDM pueden ayudar a aumentar la flexibilidad de la secuencia de vuelo de salida, dando capacidades de optimización significativas.

D. Modelo hub and spoke.

En esta modalidad de transporte, a diferencia de otros en los que el tráfico está dado por la demanda desde un punto concreto a otro de la red, hay alta posibilidad de presentar flujos de tráfico desde puntos distintos pasando por intermedios [11], motivando así a la aplicación de diversos sistemas operativos para optimizar los costos de las operaciones aeronáuticas y así mejorar los índices de ocupación de cada tramo de las rutas.

Las variaciones del modelo son:

1) *Aporte y dispersión simple:* Este modelo se encuentra en la mayoría de las redes de las aerolíneas y trata de alimentar con sub flujos de tráfico (operados por aeronaves medio-pequeñas de vuelos cortos) a un siguiente vuelo de mayor capacidad (generalmente son de largo recorrido). Por ejemplo: Un vuelo Intercontinental.

Una variación del modelo, en vuelos nacionales, es que se presenta un cambio de calibre (utilización de una aeronave de menor capacidad) si el vuelo de mayor recorrido, presenta una escala intermedia, con un tramo final de baja ocupación. Para vuelos internacionales, se deben transportar a los pasajeros de escalas anteriores hasta el tramo final (con baja ocupación).

2) *Doble aporte o dispersión:* Este modelo se caracteriza por el uso masivo de aeronaves de máxima capacidad, por lo tanto se presenta una intensa concentración de tráfico con el fin de obtener un índice de ocupación suficiente en el vuelo de largo recorrido. Sin embargo, los pasajeros quedan obligados a hacer uso de vuelos cortos en cada sentido, efectuando dos cambios de avión, siendo esto incentivado de alguna forma por las compañías aéreas mediante tarifas más económicas.

3) *Modelo de aporte y dispersión puro o por oleadas*: En este modelo los nodos centrales reciben de otros nodos una “oleada” de vuelos, los cuales llegan y salen de tal manera que permiten complementar a los restantes y a su vez puedan recibir el tráfico de ellos. Aquí el problema radica en saber escoger el *hub* central para cada ámbito de la red, ya que requiere para el mismo una posición de igual distancia de dicho nodo central frente a los otros nodos en cada ámbito o sector.

Otro problema que se presenta con este modelo, es que se presentan tiempos de viaje superiores a los vuelos directos, que está dado por el desvío de la ruta más corta entre dos puntos.

Sin embargo, aplicar estos modelos a las redes aéreas no es tarea fácil, pues no todas ellas admiten con facilidad su implementación, ya que este modelo exige ciertas condiciones precisas de introducción y desarrollo. [12]

Por otro lado, el sistema de comunicaciones entre aeropuertos presenta diversos problemas relativos a la flexibilidad de las operaciones. Retrasos tanto en el aeropuerto central como en los exteriores, pueden dar lugar a retrasos en toda la red. Además, la programación del tráfico puede ser muy exigente para los controladores del hub. Se requiere una cuidadosa sincronización para mantener la red funcionando de manera eficiente.

E. Algoritmo secuencial de aeropuerto con movimiento terrestre.

Guiar aviones alrededor de la superficie del aeropuerto mientras se aseguran rutas libres de conflictos es un problema relevante en los aeropuertos. El enrutamiento secuencial y la programación de algoritmos pueden ser ventajosos para proporcionar soluciones en línea rápidas para sistemas de apoyo de decisión con el fin de ayudar a los controladores. Sin embargo, la efectividad de dichos algoritmos depende de la secuencia de consideración del aeropuerto, la cual es frecuentemente Primero en Llegar Primero en ser atendido.

1) Algoritmo secuencial de movimiento en tierra.

El movimiento en tierra consiste en guiar el avión, en el suelo del aeropuerto, desde su puerta/puesto hasta la pista o viceversa. Importante tener en cuenta que las rutas *libres de conflicto* se deben encontrar donde el avión presente restricciones de tiempo específicas, durante el proceso de rodaje y al inicio/final de la ruta. El algoritmo QPPTW (por sus siglas en inglés *Quickest Path Problem with Time Windows*) [14], se usó para explorar los beneficios de consideraciones de ordenamientos diferentes de las aeronaves. Se reportaron tiempos computacionales muy cortos para este algoritmo, mostrando su potencial para ser implementado en un ambiente en línea. Adicionalmente, el enfoque garantiza rutas *libres de conflicto*, no está fijada para un número de rutas predefinidas y puede incorporar restricciones adicionales para

modelar el problema del mundo real de una manera más realista comparada con otros enfoques publicados.

El algoritmo QPPTW secuencialmente fija las rutas de nuevos aviones respetando las reservaciones previas de otras aeronaves. El tiempo requerido por cada avión para completar su ruta es comparado con el tiempo que hubiera requerido si el avión estuviese aislado. Si la diferencia es mayor que el valor del umbral, el algoritmo intenta hallar una secuencia más adecuada. Una aeronave con ruta fijada habría causado este retraso, dicha aeronave es clasificada como el avión causante. En el caso de que sean varios aviones los que estén afectando a uno, el avión causante será aquel que le esté afectando la ruta desde más temprano.

A continuación se mencionan 3 heurísticas para el problema QPPTW.

▪ Heurística de cambio

Involucra el uso de un operador de cambio. En la heurística de cambio, la ruta del avión causante es sacada de la solución y después al nuevo avión se le fija y programa una ruta con base en el algoritmo QPPTW antes de cambiar la ruta del avión causante. Las demás rutas y programas son arreglados con el fin de mantener el orden y buscar reducir requerimientos de comunicación.

▪ Heurística de desplazamiento

Un operador de desplazamiento se usa en vez de uno de cambio. Contrario a la heurística anterior, la nueva aeronave es agregada justo antes del avión causante en la secuencia de aviones. Obviamente, las rutas de todas las aeronaves posteriores deben ser fijadas nuevamente para encontrar una solución razonable al problema.

▪ Heurística del mejor-desplazamiento

Las dos heurísticas anteriores buscan una mejor solución general al considerar fijar rutas primero para la nueva aeronave y después para el avión causante. De esta manera, el concepto de avión causante es la idea principal detrás de las mejoras. En esta heurística se trabaja diferente y se basa en el concepto de *Cambio de Posición Restringida* (CPS por sus siglas en inglés). El CPS permite el desplazamiento de un avión, como máximo, un número predefinido de posiciones en la secuencia. Todas las posibilidades que encuentre el CPS son exploradas para un nuevo avión y es escogida la mejor. Nuevamente, todas las rutas se vuelven a fijar para las aeronaves después de establecer la nueva posición para garantizar una solución factible.

F. Desplazamiento terrestre para el mejoramiento de las estimaciones del tiempo de rodaje en los aeropuertos.

Con el esperado y continuo incremento en materia de transporte aéreo, la mitigación de los retrasos constantes y los efectos ambientales está adquiriendo cada vez más

importancia, y los requerimientos de métodos sofisticados de aproximación en la zona de operaciones aeronáuticas del aeropuerto van en aumento.

Predicciones mejoradas en tiempo de reposo (para lograr recursos mejorados de asignación durante el reposo) y predicciones de tiempo de despegue (Para lograr mejoras en la coordinación aeroportuaria del espacio aéreo), requieren predicciones más acertadas del tiempo de rodaje tal como lo hacen los modelos de desplazamiento terrestre que están siendo desarrollados.

Calibrar los modelos mencionados requiere a su vez un historial de la base de datos donde se exponga el tiempo que tarda la aeronave en desplazarse por el aeropuerto, no obstante la información obtenida incluye retrasos significativos debido a contenciones entre los aviones. Existen modelos de predicción que combinan el trazado del aeropuerto e información histórica de los tiempos de rodaje dentro de múltiples análisis de regresión lineal, identificando los factores más relevantes que afectan la variabilidad por llegadas y salidas.

La ejecución puntual de vuelos en cada aeropuerto y la visibilidad temprana de retrasos en los mismos (permitiendo que tomen lugar las medidas correctivas pertinentes) están adquiriendo cada vez más importancia desde que muchos vuelos posteriores pueden ser afectados por retrasos de una sola aeronave. Así mismo, las operaciones en aeropuertos centrales concurridos están experimentando un foco incrementado de atención y esto probablemente incrementará para el enfrentamiento de futuros desafíos.

Los tiempos totales de rodaje desde la puerta a la pista son necesarios si a su vez se requieren predicciones avanzadas de tiempo de despegue, para ser usados por controladores de ruta (o sistemas de apoyo de decisiones para asistirles) o para mejorar las predicciones de horarios de llegada en los aeropuertos de destino, permitiendo así la mitigación de los efectos de cualquier retraso predicho.

Los tiempos de rodaje son actualmente requeridos por diversos algoritmos de búsqueda existentes para la predicción de la hora de despegue y la secuenciación del despegue [23] y para la asignación apropiada de zonas de enganche de la aeronave, con el fin de absorber retrasos terrestres en la puerta, lo cual disminuye el agotamiento de combustible y los efectos ambientales [24].

La práctica común actual es usar el estándar de tiempo promedio de rodaje para cada fuente y lugar de destino de los mismos. Un mejor entendimiento de los factores influyentes y un modelo de estimación de dichos tiempos de rodaje con un mayor nivel de exactitud, tendría efectos positivos para los alcances publicados y los actuales sistemas en uso.

La importancia del problema del movimiento en tierra, destaca la complejidad del cómo se conectan diversas operaciones aeroportuarias tales como secuenciación en pista y asignación de puertas [25]. El mejoramiento del desplazamiento terrestre puede aumentar las ejecuciones a tiempo en los aeropuertos, así que los modelos y las simulaciones de desplazamientos terrestres y optimizadores son extremadamente útiles. Estos, por lo general modelan la interacción usualmente explícita entre las aeronaves (modelados de retraso debido a otras aeronaves o a cambio de rutas necesarias o rutas más largas para evitar conflictos), y, por lo tanto, requieren de predicciones para tiempos de rodaje que no incluye estos elementos [26]. El uso de un historial de la información sería preferible para calibrar modelos, no obstante, toda la información de dicho historial incluye significantes retrasos debido a la interacción entre aeronaves.

Las causas y efectos de la variabilidad del tiempo de los periodos entre llegadas y salidas son constantemente ignoradas. Sin embargo, algunos elementos han sido considerados en el pasado, como es el caso de Rappaport et al [27], quien analizó el efecto en los horarios de rodaje teniendo que reducir la velocidad en los giros, lo cual demostró que la aeronave viajando en línea recta alcanza un promedio de velocidad más alta que aquellas que tienen giros. Adicionalmente, Idris et al [28] realizó un análisis estadístico de las aeronaves que salieron en *Boston Logan International Airport* con la conclusión de que el tiempo fuera de rodaje para las configuraciones de las diferentes combinaciones entre pistas y aerolíneas, dependía altamente del tamaño de la fila de despegue, sin embargo, el análisis de Idris solo cubrió el tiempo de rodaje de aeronaves salientes.

El problema también parece diferir entre aeropuertos norteamericanos y aeropuertos europeos, con filas de despegue mucho más cortas observadas en enclaves aeroportuarios europeos. Un modelo de filas e impacto potencial en la reducción de emisiones. [29]. El análisis estadístico usó exclusivamente el tamaño de la fila de despegue para estimar el tiempo de rodaje hacia atrás. Y un presentó un modelo para la predicción del tiempo de rodaje hacia atrás, basado en refuerzo de algoritmos de aprendizaje [30]; por otro lado, también se analizan los retrasos de retroceso en el aeropuerto internacional de Denver con tendencias estacionales y patrones diarios de propagación. [31]

El objetivo de estudio extensivo de tiempos de rodaje no solo en las aeronaves que parten sino también en los arribos, posibilitan a los investigadores realizar predicciones de tiempo de rodaje cada vez más acertadas y desarrollar sistemas de apoyo de decisiones en desplazamientos terrestres más realistas, con potenciales resultados tales como operaciones aeroportuarias más sencillas, reducción de emisiones para los procesos de rodajes y mejores ejecuciones puntuales en los aeropuertos.

V. LATINOAMERICA

Según el Análisis de Capacidad de Latinoamérica y el Caribe 2014, publicado por la Asociación Latinoamericana y del Caribe de Transporte Aéreo (ALTA) –con cifras al 2013–, por El Dorado transitaron el año pasado 229.446 vuelos frente a 346.788 del aeropuerto de Ciudad de México y 261.076 del Guarulhos de São Paulo; con lo que el aeropuerto El Dorado se consolida como el tercer terminal que mayor movilidad tiene en el continente después de sus similares de Ciudad de México y el Guarulhos de São Paulo, ciudad brasileña que tiene además los aeropuertos de Congonhas y Viracopos, donde se hace importante que la logística en aeropuertos latinoamericanos, como estos se encuentre bien estructurada, para que el funcionamiento del aeropuerto, vaya acorde a lo que demanda, pues se sabe que los requisitos técnicos para un sistema eficaz de CDM, como lo son los canales seguros y protegido de comunicación, existen hoy en día, pero que haciendo un uso adecuado de ellos, pueden conducir a una mejor utilización de los recursos, así como la reducción de los retrasos y de otro tipos de inconvenientes que se presentan a diario en un aeropuerto.

A. Modelo hub and spoke aplicado en América.

Para el caso latinoamericano, el sistema *hub and spoke* es uno de los métodos mayor utilizados por las aerolíneas latinas, debido a que gran cantidad de ellas no podían operar vuelos directos a muchas otras ciudades, por lo que de ahí surgió el sistema de *hubs*, aeropuertos base desde los cuales se ofrecían los *spokes*, es decir las rutas radiales.

En la actualidad, el sistema de *hub and spoke* se usa para vuelos con largo recorrido, donde se unen diferentes ciudades de gran importancia turística, económica, comercial, logística, etc., con aviones de gran capacidad. En caso que el destino final del pasajero no sean esos *hubs*, se usan vuelos desde allí, para su destino cercano. Así, se gestiona de mejor manera la ocupación de los aviones, se generan economías de escala y se reducen costos.

Por ejemplo, en el caso de una ruta Cali- Rotterdam con Avianca, se presenta el caso que no hay un vuelo directo entre estas ciudades, y para poder cumplir con el trayecto del pasajero lo que Avianca hace es generar una ruta Cali-Bogotá (*hub* central de la aerolínea); sin embargo, en el aeropuerto de Bogotá no se encuentran vuelos directos a la ciudad final del pasajero, teniendo que recurrir a uno de sus aliados como lo es Lufthansa, que será ahora la aerolínea encargada de llevar al pasajero hasta su *hub* en Frankfurt y desde allí transportarlo en uno de sus vuelos continuos a Rotterdam. Esto se presenta debido a que diariamente no sale la cantidad mínima de pasajeros necesarios para que un avión pueda cubrir esa ruta, razón por la cual se generan ese tipo de alianzas entre las aerolíneas, para en conjunto ir llenando el cupo de sus respectivos aviones.

Con lo anterior, los centros de conexiones toman gran importancia, pues es necesario que las aerolíneas cuenten la infraestructura adecuada para distribuir a sus pasajeros, pasándolos entre sus vuelos de conexión y sus vuelos a destino final. A esto, se suma la importancia de los acuerdos entre aerolíneas, pues al tener un alcance regional limitado, deben encargarse a sus aliadas de la distribución final.

B. Ejemplo de otros modelos aplicados en América.

Dos modelos de programación lineal entera se han planteado para resolver de manera sucesiva, para determinar, en un Aeropuerto Internacional de Chile, el personal necesario para operar el patio de equipajes. La herramienta de optimización presentó mejoras importantes en la operación. [34]

Así mismo, se desarrollaron modelos de optimización de los recursos para atender la secuenciación de llegadas de aeronaves al aeropuerto Internacional de Forth Worth en Dallas, TX; teniendo en cuenta el tipo de avión y todas las condiciones de seguridad requeridas. Los resultados del modelo arrojaron una reducción aproximada de seis minutos en la atención de cada avión, lo que reduce ampliamente el tráfico en pista. [35]

VI. CONCLUSIONES

- Estados Unidos es el país de origen de la mayor cantidad de publicaciones sobre el tema investigado, en particular en temáticas de: gestión del flujo del tráfico aéreo, modelos de desplazamiento de aeronaves en tierra, programación de tripulación, entre otros.
- La aplicación del modelo de gestión de tráfico aéreo en Europa puede ser más complejo de implementar que en los Estados Unidos, pues en Europa se requiere un acuerdo entre las distintas partes interesadas en un conjunto fundamental de las "reglas del juego", como FSFS o RBS. Por lo tanto, el desarrollo de un programa MDL exitoso para ATFM en Europa puede requerir ingenio considerable y tiempo.
- Para el caso del modelo para el control de tráfico aéreo, la característica más importante es que se incluyen las decisiones de cambio de ruta y estas se formulan de una manera muy compacta. De hecho, no requiere ninguna variable adicional, sólo introduce nuevas restricciones, que implementa condiciones de enrutamiento local.
- Dos modelos relevantes en optimización sobre logística aeroportuaria se han trabajado donde el primero: QPPTW, se considera como una interrelación entre problemas clásicos como el problema de la ruta más corta y el problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo.

▪ El segundo modelo trabajado a nivel de aerolíneas es el de la programación de tripulaciones, como un problema de Timetabling que considera tiempos de turno, alteraciones de vuelos, etc.

REFERENCIAS

- [1] Lulli Guglielmo; ODoni Amedeo. European Air traffic flow management problema. *Transportation Science* Vol. 41, No. 4, November 2007, pp. 431–443.
- [2] Richetta, O., ODoni A. Solving optimally the static ground- holding policy problem in air traffic control. *Transportation Science*. 27 2004. pp228–238.
- [3] Vossen, T., M. O. Ball. Optimization and mediated bartering models for ground delay programs. *Naval Res. Logist.* 53 2006 p.p 75–90.
- [4] Bertsimas, D., STOCK Patterson. The traffic flow management rerouting problem in air traffic control: A dynamic network flow approach. *Transportation Sci.* 34 1998 p.p 239–255.
- [5] BERTSIMAS, D., STOCK Patterson. The traffic flow management rerouting problem in air traffic control: A dynamic network flow approach. *Transportation Sci.* 34 2000 p.p 239–255.
- [6] Bertsimas, D. and Stock, S. The traffic flow management rerouting problem in air traffic control: A dynamic network flow approach. *Transportation Sci.* 34. 2004. p. 239–255.
- [7] A. Karp. Size Matters at LaGuardia. *Air Transport World*, on line <http://www.atwonline.com>, 8380 Colesville Rd., Suite 700, Silver Spring, MD 20910, 2006. [Consultado en agosto de 2014].
- [8] N. Pujet, B. Delcaire, and E. Feron. Input-output modeling and control of the departure process of congested airports. *American Institute of Aeronautics and Astronautics, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02140*, 2009.
- [9] Mohleji and Tene. Minimizing Departure Prediction Uncertainties for Efficient RNP Aircraft Operations at Major Airports. *The MITRE Corporation Center for Advanced Aviation System Development, McLean, VA 22102*, 2006.
- [10] F. Carr, A. Evans, J.P. Clarke, and E. Feron. Modeling and Control of Airport Queuing Dynamics under Sever Flow Restrictions. *International Center for Air Transportation, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02140*, 2004.
- [11] Kanafani, A. (2003): *Transportation demand analysis*. New York, McGraw Hill, 320 pags.
- [12] Terrab, M., A. Odoni. Strategic flow control on an air traffic network. *Oper. Res.* 41 2003 pp 138–152.
- [13] Atkin, J.A.D., Burke, E.K., Ravizza, S.: The airport ground movement problem: Past and current research and future directions. In: *Proceedings of the 4th International Conference on Research in Air Transportation*, Budapest, Hungary, 2010 pp. 131–138.
- [14] Atkin, J.A.D., Burke, E.K., Ravizza, S.: A more realistic approach for airport ground movement optimisation with stand holding. In: *Proceedings of the 5th Multidisciplinary International Scheduling Conference (MISTA 2011)*, Phoenix, Arizona, USA (2011).
- [15] Odoni, A.R.: The Flow Management Problem in Air Traffic Control. In: Odoni, A.R., Bianco, L., Szego, G. (eds.) *Flow Control of Congested Networks*, pp. 269–288. Springer, Berlin (1997).
- [16] Lulli, G., Odoni, A.R.: The European Air Traffic Flow Management Problem. *Transportation Science* 41, 1–13 (2007).
- [17] Lindsay, K., Boyd, E., Burlingame, R.: Traffic flow management modeling with the time assignment model. *Air Traffic Control Quarterly* 1, 255–276 (2003).
- [18] Bertsimas, D., Odoni, A.: A critical survey of optimization models for tactical and strategic aspects of air traffic flow management. Technical report, NASA (2007).
- [19] Bertsimas, D., Stock Patterson, S.: The Traffic Flow Management Rerouting Problem in Air Traffic Control: A Dynamic Network Flow Approach. *Transportation Science* 34, 239–255 (2005).
- [20] Bertsimas, D., Stock, S.: The Air Traffic Management Problem with Enroute Capacities. *Operations Research* 46, 406–422 (1998).
- [21] Lulli G., Bertsimas, D., Odoni, A.: The Air Traffic Flow Management Problem: An Integer Optimization Approach. *Sloan School of Management and Operations Research Center, M.I.T.* (2008).
- [22] Atkin JAD, Burke EK, Greenwood JS and Reeson D. Hybrid metaheuristics to aid runway scheduling at London
- [23] Heathrow airport. *Transportation Science* 41 2007(1): pp 90–106.
- [24] Atkin JAD, Burke EK and Greenwood JS. TSAT allocation at London Heathrow: The relationship between slot compliance, throughput and equity. *Public Transport* 2(3): 2010a pp173–198.
- [25]¹ Atkin JAD, Burke EK and Ravizza S. The airport ground movement problem: Past and current research and future directions. In: *Proceedings of the 4th International Conference on Research in Air Transportation (ICRAT)*, Budapest, Hungary, 2010b pp. 131–138.
- [26] Gotteland J-B and DURAND N. Genetic algorithms applied to airport ground traffic optimization. *Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation (CEC)*, Canberra, Australia 2003 pp 544–551.
- [27] Rappaport DB, Yu P, Griffin K and Daviau C (2009). Quantitative analysis of uncertainty in airport surface operations. In: *Proceedings of the 9th AIAA Aviation*

- Technology, Integration, and Operations Conference, Hilton Head, SC.
- [28] Idris HR, Clarke JP, Bhuva R and Kang L (2002). Queuing model for taxi-out time estimation. *Air Traffic Control Quarterly* 10(1): 1–22.
- [29] Simaiakis, I. and Balakrishnan, H. (2009). Queuing models of airport departure processes for emissions reduction. In: *Proceedings of the AIAA*.
- [30] Balakrishna P, Ganesan R and Sherry L (2009). Application of reinforcement learning algorithms for predicting taxi-out times. In: *Proceedings of the 8th ATM R&D Seminars*, Napa, USA.
- [31] Tu Y, Ball MO and Jank WS (2008). Estimating flight departure delay distributions—A statistical approach with long-term trend and short-term pattern. *Journal of the American Statistical Association* 103(481): 112–125.
- [32] Barnhart, C.; Belobaba, P. and Odoni, A.R. Applications of Operations Research in the Air Transport Industry. *Transportation Science*, 37(4). 2005. p. 368-39.
- [33] “Notas de estudio sobre la integración del transporte aéreo en Latinoamérica” CLAC GEPEJTA. Lima, Perú. 2010.
- [34] Cavada, J. et al. (2012). Modelo de planificación y asignación de personal para el patio de equipajes de un aeropuerto internacional. *Congreso Latino-Iberoamericano de Investigación Operativa*. Rio de Janeiro. Brazil.
- [35] Rathinam, S. et al. (2008). An optimization model for reducing aircraft taxi times at the Dallas Fort Worth international airport. 26th international congress of the aeronautical sciences.

BIOGRAFÍA



Andrea C. Castellanos.

Es egresada del programa de pregrado de ingeniería industrial de la Universidad Industrial de Santander.



Javier Arias Osorio.

Es egresado de la Universidad Industrial de Santander. Magíster en administración con énfasis en comercio electrónico de la UNAB-ITESM. Profesor tiempo completo de la UIS. Vinculado al grupo de investigación OPALO en la línea de optimización de procesos logísticos.