



INSTITUTO
MEXICANO DEL
TRANSPORTE



Certificación ISO 9001:2008 ‡

ESTRATEGIA PARA MINIMIZAR LOS COSTOS DE OPERACIÓN DE LAS AERONAVES Y LAS DEMORAS DE LOS PASAJEROS EN AEROPUERTOS SATURADOS

Alfonso Herrera García

**Publicación Técnica No. 343
Sanfandila, Qro, 2011**

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

Estrategia para minimizar los costos de operación de las aeronaves y las demoras de los pasajeros en aeropuertos saturados

**Publicación Técnica No. 343
Sanfandila, Qro, 2011**

Esta investigación fue realizada en la Coordinación de Integración del Transporte (CIT) del Instituto Mexicano del Transporte por el M. en I. Alfonso Herrera García.

El autor agradece los comentarios, sugerencias y apoyo del Coordinador de la CIT, Dr. Carlos Daniel Martner Peyrelongue.

Índice

Resumen	V
Abstract	VII
Resumen ejecutivo	IX
1 Introducción	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Objetivo	1
2 Metodología	3
2.1 Introducción	3
3 Determinación del orden de atención para minimizar los costos de operación	7
3.1 Desarrollo mediante hoja de cálculo	7
3.1.1 Solución exacta para dos aeronaves, sin restricciones de tiempo	7
3.1.2 Solución exacta para tres aeronaves, sin restricciones de tiempo	9
3.1.3 Solución exacta para cuatro aeronaves, sin restricciones de tiempo	9
3.1.4 Solución exacta para cinco aeronaves, sin restricciones de tiempo	11
3.1.5 Solución para más de cinco aeronaves	13
3.2 Solución para el caso de las demoras de pasajeros	16
4 Aplicación de la estrategia para cuantificar los beneficios	17
4.1 Costos de operación para cinco aeronaves	17
4.2 Demoras por pasajero para cinco aeronaves	18
4.3 Costos de operación y demoras por pasajero para diez aeronaves	19
4.4 Análisis de resultados	21
4.5 Discusión	21
5 Alternativas administrativas para promover la aplicación de la estrategia propuesta	23
6 Conclusiones y recomendaciones	25
Bibliografía	29

Resumen

En este trabajo se desarrolla una estrategia para determinar el orden de atención de las aeronaves, en un aeropuerto saturado, durante las fases de despegue y aterrizaje, con objeto de minimizar sus costos de operación y las demoras de los pasajeros. Además, se consideraron tres políticas administrativas que pueden promover la estrategia propuesta.

La base para determinar la estrategia fue mediante la aplicación de un algoritmo heurístico; su ventaja reside en que permite obtener el orden de atención, los costos de operación y las demoras mínimas en un tiempo muy reducido.

Los resultados, presentados mediante tablas y figuras, muestran que al aplicar la estrategia propuesta se pueden obtener reducciones significativas, de hasta 47.6% en los costos de operación y de 73.2% en las demoras de los pasajeros. La magnitud de los beneficios depende de la proporción de las distintas clases de aeronaves que operan en un aeropuerto determinado.

Para un trabajo futuro se piensa vincular la estrategia con un modelo de simulación con objeto de estimar los beneficios no sólo en un determinado tamaño de cola, sino en un día de operación típico, para soportar cuantitativamente la implementación de la estrategia.

Palabras clave: aeronave, aeropuerto, algoritmo heurístico, costo de operación, demora, estrategia.

Abstract

In this paper was developed a strategy for attending to the takeoffs and landings at congested airports, in order to reduce aircraft operating costs and passenger delay times. In addition, three administrative policies were considered for promoting the proposed strategy.

The order of attention given to each aircraft was obtained using a heuristic algorithm that did not require enumeration of all the possible sequences. Consequently, the solution could be obtained in a short time.

Results when using this strategy, that were presented using tables and figures, showed that significant reductions of up to 47.6% in operating costs and 73.2% in passenger delays could be achieved. The amount of benefits achieved depends on the proportion of aircraft wake turbulence classes that operate in a given airport.

In a future investigative work the proposed strategy would be to link it up with a simulation model in order to calculate the benefits not only in a specific size of queue, but in a typical daily operation to obtain figures that would support the implementation of the strategy.

Keywords: aircraft, airport, delay, heuristic algorithm, operating cost, strategy.

Resumen ejecutivo

1 Introducción

En el espacio aéreo mexicano los pilotos deben aplicar las normas, métodos y procedimientos establecidos en la normatividad vigente, la cual está estandarizada mediante normas internacionales recomendadas por la Organización de Aviación Civil Internacional. En cuanto a la asignación de salidas y llegadas de aeronaves a un aeropuerto, el servicio de control de aeródromo lo ordena y autoriza conforme a la secuencia de solicitud de los pilotos.

En la estrategia que se propone, a diferencia de este principio, se desarrolla un nuevo enfoque para administrar las operaciones de despegue y aterrizaje, reestructurando el orden de atención con objeto de minimizar los costos de operación de las aeronaves y las demoras de los pasajeros.

2 Metodología

Actualmente las aeronaves son atendidas en los aeropuertos de acuerdo con el orden en que solicitan su servicio; es decir, con base en el principio “la primera que llega es la primera que se atiende”, sin embargo, dicha estrategia no considera que el costo de operación de las aeronaves es diferente, dependiendo de su tipo. Por ello, cuando se forma una línea de espera en un aeropuerto solicitando servicio en sus pistas, se pueden generar ahorros significativos en su operación al reordenar la secuencia de atención.

El número de alternativas posibles de atención de las aeronaves depende de la cantidad de las mismas que estén en línea de espera. Se sabe que el número de secuencias posibles para atender N aeronaves es $N!$

El primer paso para encontrar la solución óptima consiste en enumerar todas las alternativas posibles, enseguida calcular los costos de operación de cada una y finalmente determinar el valor mínimo. Sin embargo, una enumeración exhaustiva de cada alternativa sólo es práctica para aquellos casos con pocas aeronaves, debido a que su número crece rápidamente.

3 Determinación del orden de atención para minimizar los costos de operación

Mientras no existan aeronaves en espera, el orden de atención se establece mediante el orden en que se solicita cada servicio. Sin embargo, cuando hay dos o más aeronaves solicitando servicio, el orden en que deben atenderse ya no es trivial.

Solución exacta para dos aeronaves

La formulación del problema es como sigue: considere la pista de un aeropuerto como un servidor que debe atender las solicitudes de servicio (despegues y aterrizajes) de un cierto número de aeronaves $N = \{1, \dots, N\}$.

También es necesario considerar que el conjunto de aeronaves por atender tiene distintas características, para este trabajo los valores de interés son los costos de operación directos por unidad de tiempo y los tiempos requeridos para realizar la operación solicitada por tipo de aeronave.

Suponga ahora que se desean reducir al mínimo, los costos de operación de las aeronaves que están en espera de ser atendidas, durante las fases de despegue y aterrizaje. Para ello se definirán como $c_1, c_2, c_3, \dots, c_n$, a los costos de operación por unidad de tiempo para cada tipo de aeronave. Considere también que los tiempos de servicio por tipo de aeronave son $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$.

Para este caso en particular sólo hay dos formas posibles de atender las aeronaves. Los costos respectivos de operación para cada caso son los siguientes:

$$\text{Para } 1 \rightarrow 2; \quad (C_1 \times \tau_1) + (C_2 \times \tau_2) = C_1 \times t_1 + C_2 \times (t_1 + t_2)$$

$$\text{Para } 2 \rightarrow 1; \quad (C_2 \times \tau_2) + (C_1 \times \tau_1) = C_2 \times t_2 + C_1 \times (t_2 + t_1)$$

Como se aprecia el orden en que se atiende a las aeronaves repercute directamente en el costo de operación asociado. En el caso anterior se debe elegir aquel orden en que se obtenga el menor valor del producto $C_1 \times t_1 + C_2 \times (t_1 + t_2)$ ó $C_2 \times t_2 + C_1 \times (t_2 + t_1)$.

Solución exacta para tres aeronaves

En este caso, como se tienen tres aeronaves, se presentan seis formas posibles de atención, es decir 3!

Los costos de operación son del tipo:

$$(C_1 \times t_1) + [C_2 \times (t_1 + t_2)] + [C_3 \times (t_1 + t_2 + t_3)]$$

Solución exacta para cuatro aeronaves

En este caso se presentan 24 formas posibles de atención de las aeronaves, es decir 4!

Los costos de operación son del tipo:

$$(C_1 \times t_1) + [(C_2 \times (t_1 + t_2))] + [C_3 \times (t_1 + t_2 + t_3)] + [C_4 \times (t_1 + t_2 + t_3 + t_4)]$$

Solución exacta para cinco aeronaves

En este caso se presentan 120 formas posibles de atención de las aeronaves, es decir $5!$; los costos de operación son del tipo:

$$(C_1 \times t_1) + [C_2 \times (t_1 + t_2)] + [C_3 \times (t_1 + t_2 + t_3)] + [C_4 \times (t_1 + t_2 + t_3 + t_4)] + [C_5 \times (t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5)]$$

Ocupando las formulas anteriores, mediante una hoja de cálculo, es posible obtener las soluciones exactas de la secuencia de atención de las aeronaves que ofrece el costo de operación mínimo.

Solución para más de cinco aeronaves

El enfoque utilizado para el caso de más de cinco aeronaves emplea un algoritmo heurístico que se fundamenta en tres principios. Dichos principios fueron establecidos con base en el comportamiento observado en el orden de atención al atender colas de dos, tres, cuatro y cinco aeronaves.

Principio uno: Considere un grupo de $n-1$ aeronaves, en cuyo caso es conocida la secuencia de atención que produce el costo de operación mínimo. Suponga que posteriormente una aeronave n es agregada a la cola, el orden de atención que presenta el costo de operación mínimo para este nuevo grupo, corresponde a alguna de las n alternativas en las cuales la aeronave n es colocada al inicio, entre o al final de la secuencia que produce inicialmente el costo de operación mínimo.

Este principio abre la posibilidad de obtener la secuencia que ofrece el costo de operación mínimo, en una forma rápida y sin enumerar y calcular todas las posibilidades.

Principio dos: El orden de atención que genera el costo de operación máximo es el orden inverso de la secuencia que corresponde al costo de operación mínimo.

Principio tres: El valor del costo de operación promedio de todas las alternativas es la media entre el valor mínimo y máximo.

Solución para el caso de las demoras de pasajeros

Al utilizar el procedimiento anterior es posible obtener el orden de atención que genera el valor mínimo de las demoras de los pasajeros, si en lugar del costo de operación unitario (c_i) es utilizado el número de pasajeros en cada aeronave (p_i).

La demora de los pasajeros (DP) para un grupo de aeronaves A, B, C, ...N, es:

$$DP_{A,B,C,\dots,N} = p_B(t_A) + p_C(t_A+t_B) + \dots + p_N(t_A+t_B+t_C+\dots+t_{N-1})$$

Observe como esta ecuación tiene la misma estructura que la obtenida para los costos de operación. Por lo tanto, los tres principios señalados antes, aplican en forma equivalente a las demoras de los pasajeros.

4 Aplicación de la estrategia para cuantificar los beneficios

La metodología señalada anteriormente fue aplicada para determinar los beneficios potenciales de reordenar la secuencia de atención de las aeronaves, en un aeropuerto hipotético. Los beneficios fueron cuantificados en términos de la reducción de los costos de operación y de las demoras de pasajeros.

Se consideraron líneas de espera de cinco y diez aeronaves cada una. Se consideró que los valores promedio de los costos de operación y de las demoras de los pasajeros correspondían a la política actual de atención; y que los valores obtenidos con el algoritmo heurístico correspondían a la estrategia propuesta.

Costos de operación y demoras por pasajero para cinco aeronaves

En este caso fueron considerados grupos de cinco aeronaves en diferentes proporciones de acuerdo con su clasificación por estela de turbulencia.

En relación con la secuencia de atención que reduce los costos de operación y las demoras, los resultados mostraron que en todos los casos estos grupos de aeronaves están ordenados de acuerdo con sus clases, y que la secuencia de atención para cada una siguió la prioridad de pesada, grande y pequeña.

También se observó que en la mayoría de los casos, dentro de la misma clase de aeronaves, los valores más altos de c_i para los costos de operación, y de p_i para las demoras, correspondieron generalmente a las aeronaves que fueron atendidas inicialmente.

Costos de operación y demoras por pasajero para diez aeronaves

En este caso fueron considerados grupos de diez aeronaves, en todas sus posibles combinaciones, de las tres clases de aeronaves. En relación con la secuencia de atención de atención que reduce los costos de operación y las demoras se observó en general el mismo comportamiento señalado para el caso de cinco aeronaves.

Análisis de resultados

En general cuando las colas tiene solamente una clase de aeronaves, los beneficios son más bajos que cuando hay una mezcla de distintas clases. En términos relativos los resultados mostraron que se pueden obtener reducciones

significativas de hasta 47.6% en los costos de operación y de 73.2% en las demoras de los pasajeros, dependiendo de las diferentes proporciones de las clases de aeronaves.

El beneficio potencial es proporcional al tamaño de las colas, por ejemplo, en el caso de los costos de operación al duplicarse el tamaño de la cola, el beneficio se triplicó; y para las demoras, al duplicarse el tamaño de la cola, el beneficio se cuadruplicó.

5 Alternativas administrativas para promover la aplicación de la estrategia propuesta

Existen diversos esquemas que servirían para fomentar la política propuesta, en forma genérica se tienen tres alternativas:

- Esquema en el que cada aerolínea obtiene las reducciones o incrementos en sus costos de operación.
- Esquema en el que parte de los beneficios de las aerolíneas que obtuvieron reducciones en sus costos de operación, se transfieren hacia las aerolíneas que incrementaron sus costos de operación.
- Una tercera posibilidad se presenta cuando una mayor parte de los ahorros, en las aerolíneas beneficiadas inicialmente, se transfieren a las aerolíneas que han incrementado sus costos de operación en un valor tal que se reducen sus costos de operación iniciales.

6 Conclusiones y recomendaciones

El enfoque utilizado para establecer la estrategia es un procedimiento simplificado que obtiene la secuencia de atención de las aeronaves para reducir los costos de operación y las demoras de los pasajeros, sin la necesidad de enumerar todas las posibles alternativas. Su ventaja reside en que no requiere de una gran cantidad de tiempo para obtener la solución.

En caso de reestructurar la atención de aeronaves con el esquema propuesto, se pueden obtener beneficios significativos para ambos, pasajeros y aerolíneas.

También se observó que para reducir los costos de operación y las demoras de los pasajeros, generalmente las aeronaves más grandes deben ser atendidas primero y las más pequeñas al final. Esta condición propicia la utilización de aeronaves de grandes dimensiones, sin embargo, esto puede generar la congestión de otras instalaciones de procesamiento en algún subsistema del aeropuerto, por ejemplo, en el de reclamo de equipaje.

Existe potencial para aplicar la estrategia propuesta en muchos aeropuertos de América, Europa y Asia.

Se consideraron tres políticas administrativas que pueden promover la estrategia propuesta. Aparentemente, la tercera opción, en la cual todas las aeronaves reducen sus costos de operación, es la más viable. Aunque la factibilidad de cada opción depende de las cantidades y proporciones de las clases de aeronaves presentes en las líneas de espera de cada aeropuerto.

Se planea para un trabajo futuro, vincular la estrategia propuesta, con un modelo de simulación con objeto de estimar los beneficios, no sólo en un determinado tamaño de cola, sino en un día de operación típico para obtener cifras que soporten la implementación de la estrategia.

1 Introducción

1.1 Antecedentes

En el espacio aéreo mexicano los pilotos deben aplicar las normas, métodos y procedimientos establecidos en las leyes, reglamentos y normatividad mexicana vigente, los cuales están estandarizados por normas internacionales recomendadas por la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), en sus diversos documentos derivados del Convenio de Aviación Civil Internacional.

En cuanto a la asignación de salidas y llegadas de aeronaves a un aeropuerto, el servicio de control de aeródromo lo ordena y autoriza conforme a la secuencia de solicitud de los pilotos. Las excepciones a esta regla son: para aquellas aeronaves que sean obligadas a aterrizar debido a causas que afecten la seguridad de la operación misma; y para aeronaves que lleven enfermos y/o lesionados graves que requieran urgentemente atención médica (SENEAM, 2008¹).

En la estrategia que se propone, a diferencia de este principio, se desarrolla un nuevo enfoque para administrar las operaciones de despegue y aterrizaje, reestructurando el orden de atención, con objeto de minimizar los costos de operación de las aeronaves y las demoras de los pasajeros.

Los impactos y trascendencia de esta investigación se centran en dos áreas:

- a) La primera se relaciona con el aspecto metodológico, puesto que se establece una estrategia que puede utilizarse en cualquier aeropuerto (enfoque dirigido al objetivo general).
- b) En el aspecto operativo, propone una nueva forma de administrar las fases de despegue y aterrizaje de las aeronaves, con objeto de minimizar sus costos operativos.

1.2 Objetivo

Desarrollar una estrategia para determinar el orden de atención de las aeronaves en un aeropuerto saturado, durante las fases de despegue y aterrizaje, con objeto de minimizar sus costos de operación y las demoras de los pasajeros.

¹ ENR 1.4-1; ENR 1.1-23, 19.1; AIC 22-1983-03; y ENR 1.1-19, 10.6 y 10.7.

2 Metodología

2.1 Introducción

Actualmente las aeronaves son atendidas en los aeropuertos de acuerdo con el orden en que solicitan su servicio; es decir, con base en el principio “la primera que llega es la primera que se atiende” (FCFS, por sus siglas en inglés, *First-Come, First-Served*, o FIFO, *First-In, First-Out*), sin embargo, dicha estrategia no considera que el costo de operación de las aeronaves es diferente, dependiendo de su tipo (Tabla 2.1).

Por ejemplo, el costo de operación por unidad de tiempo, de una aeronave *Boeing 747* (con cuatro motores turboreactores), y con capacidad para 452 pasajeros, es ocho veces mayor que el de una aeronave *ATR-42* (con dos motores turbohélice), y con capacidad para 48 pasajeros.

Por ello, cuando se forma una línea de espera en un aeropuerto solicitando servicio en sus pistas, se pueden generar ahorros significativos en su operación al reordenar la secuencia de atención. La solución al problema consiste en determinar el orden de atención de las aeronaves que minimiza dichos costos.

Cabe señalar que mientras no haya aeronaves en espera, el orden de atención será establecido por el orden en que se solicita cada servicio. Sin embargo, cuando hay dos o más aeronaves ($N \geq 2$) solicitando el servicio, el orden en que deben atenderse ya no es trivial.

Por otro lado, hay una restricción que debe satisfacerse y es el hecho de que ninguna aeronave debe esperar más de 15 minutos para ser atendida durante el despegue, dado que un tiempo mayor se considera como una operación con demoras (SCT, DGAC, 2007), lo que puede originar la cancelación del vuelo.

En el caso de los aterrizajes, también se tomará ese valor como el tiempo de espera máximo con el propósito de tener un mismo nivel de calidad de servicio, en términos de tiempo de espera, para ambas fases de vuelo.

Asumamos que los costos de operación directos por unidad de tiempo para cada tipo de aeronave N , son $c_1, c_2, c_3, \dots, c_n$. Por otro lado, consideremos que los tiempos de servicio por tipo de aeronave son $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$; y que el tiempo de espera para cada aeronave i , es τ_i , este tiempo representa el intervalo que transcurre desde que dicha aeronave solicita su servicio hasta el momento en que lo inicia.

Tabla 2.1 Características de diversos tipos de aeronaves que operan en aeropuertos mexicanos

Estrategia para minimizar los costos de operación de las aeronaves y las demoras de los pasajeros en aeropuertos saturados

Aeronave ¹	Costo de operación unitario ² (dólares/segundo)	Número típico ³ de asientos	Máximo peso bruto al despegue ⁴ (lb)	Clasificación por estela de turbulencia ⁵	Duración promedio de la operación ⁶ (segundos)	
					Despegue	Aterrizaje
Learjet 36	0.26561	6	18,000	Pequeña	78	79
EMB-120	0.40600	30	25,300	Pequeña	79	80
DHC 8-100	0.43369	39	34,400	Pequeña	71	96
ATR-42	0.44969	48	36,800	Pequeña	57	93
ATR-72	0.58117	70	49,600	Grande	48	78
Boeing 737-500	0.89386	108	115,500	Grande	65	66
DC-9-30	0.94104	115	121,000	Grande	65	66
Boeing 737-300	0.84340	140	124,500	Grande	66	67
MD-80	0.96831	145	149,500	Grande	59	80
Airbus A320	1.01366	150	162,000	Grande	62	84
Boeing 727-200	1.13655	163	209,000	Grande	41	61
Boeing 767-300	1.45960	269	350,000	Pesada	52	53
Airbus A300-600	1.70309	267	363,760	Pesada	52	53
Airbus A330-300	1.78052	328	458,600	Pesada	53	54
Boeing 777-200	1.84400	440	514,000	Pesada	47	64
DC-10-30	2.60320	250	572,000	Pesada	50	67
Boeing 747-200	3.76321	452	833,000	Pesada	54	67

Nota 1: Este conjunto representa aproximadamente el 80% de los diferentes tipos de aeronaves que operaron en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM) durante 2003.

Nota 2: Los costos de operación se obtuvieron al actualizar a valores de 2010 los costos establecidos por la OACI en el 2000 (<http://www.icao.int>). Principalmente se actualizó el componente relacionado con el incremento en el costo de combustible, para ello se utilizó el índice del precio del combustible de aviación (*jet fuel price index*) establecido por la IATA (<http://www.iata.org>). El índice utilizado (222.2 puntos) corresponde al establecido para febrero de 2010.

Nota 3: El número de asientos por aeronave puede variar dependiendo de la configuración de clases establecida por cada aerolínea. Se presentan valores típicos señalados por los fabricantes de las aeronaves.

Nota 4: El máximo peso bruto al despegue (MPBD) fue obtenido del los fabricantes respectivos.

Nota 5: La clasificación de las aeronaves por estela de turbulencia está en función del MPBD. Para las pequeñas el peso debe ser menor o igual a 41,000 libras; para las grandes mayor a 41,000 y menor o igual que 255,000 libras; y para las pesadas, mayor a 255,000 libras.

Nota 6: Los tiempos de operación son valores promedio obtenidos en el AICM. Estos cifras pueden variar en cada aeropuerto, en términos generales los valores señalados son representativos.

Fuente: Elaboración propia.

Así, para un grupo de aeronaves que se está atendiendo, la aeronave N tendrá un tiempo de espera:

$$\tau_n = \sum_{i=1}^{i=n} t_i$$

En forma general se busca minimizar la siguiente función objetivo:

$$\text{Min } Z = C_1 \times t_1 + C_2 \times \tau_2 + C_3 \times \tau_3 + \dots C_n \times \tau_n$$

$$\text{Sujeta a: } \tau_i \leq 15 \text{ minutos, } \forall_i = 1, 2, 3, \dots n \quad y$$

$$\tau_i \geq 0 \text{ minutos, } \forall_i = 1, 2, 3, \dots n$$

El número de alternativas posibles de atención de aeronaves depende de la cantidad de las mismas que estén en línea de espera. De acuerdo con el teorema: *el número de permutaciones de N distintos objetos, tomados N a la vez, es N!* (Walpole y Myers, 1991), se sabe que el número de secuencias posibles para atender N aeronaves es N!

Por lo anterior, en el caso de que se tengan pocas aeronaves en espera, se plantea un problema manejable en una hoja de cálculo electrónica; por ejemplo para 10 aeronaves (N=10), hay $10! = 3,628,800$ arreglos posibles; sin embargo, para quince aeronaves se tendría más de un billón de arreglos posibles ($15! = 1,307,674,368,000$); y para 20 aeronaves habría más de dos trillones de posibilidades ($20! = 2,432,902,008,176,640,000$).

El primer paso para encontrar la solución óptima sería enumerar todas las alternativas posibles, enseguida calcular los costos de operación de cada una y finalmente determinar el valor mínimo. Sin embargo, una enumeración exhaustiva de cada alternativa sólo es práctica para aquellos casos con pocas aeronaves, debido a que su número crece rápidamente.

3 Determinación del orden de atención para minimizar los costos de operación

3.1 Desarrollo mediante hoja de cálculo

Mientras no existan aeronaves en espera, el orden de atención se establece mediante el orden en que se solicita cada servicio. Sin embargo, cuando hay dos o más aeronaves ($N \geq 2$) solicitando servicio, el orden en que deben atenderse ya no es trivial. Inicialmente se determina el orden de atención de las aeronaves sin considerar que existe una restricción de tiempo para atenderlas.

3.1.1 Solución exacta para dos aeronaves, sin restricciones de tiempo²

La formulación del problema es como sigue, considere la pista de un aeropuerto como un servidor que debe atender las solicitudes de servicio (despegues y aterrizajes) de un cierto número de aeronaves $N = \{1, \dots, N\}$.

También es necesario considerar que el conjunto de aeronaves por atender tiene distintas características (tipos de aeronaves), para este trabajo los valores de interés son los costos de operación directos por unidad de tiempo, y los tiempos requeridos para realizar la operación solicitada por tipo de aeronave.

Suponga ahora que se desean reducir al mínimo, los costos de operación de las aeronaves que están en espera de ser atendidas, durante las fases de despegue y aterrizaje. Para ello se definirán como $c_1, c_2, c_3, \dots, c_n$, a los costos de operación por unidad de tiempo para cada tipo de aeronave.

Considere también que los tiempos de servicio por tipo de aeronave son $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$.

Se definirá al tiempo de espera para cada aeronave i , como τ_i , este tiempo representa el intervalo que transcurre desde que dicha aeronave solicita su servicio hasta el momento en que lo inicia. Observe como los tiempos de espera, para las aeronaves, que están tanto en tierra como en aire, son iguales a la suma de los tiempos de servicio de las aeronaves que se atienden antes que ellas, más el tiempo de su operación.

Así, para un grupo de aeronaves que se está atendiendo, la aeronave n tendrá un tiempo de espera:

² El término "sin restricciones de tiempo" se refiere a que no se establece ningún tiempo máximo de espera antes de ser atendida cada aeronave.

$$\tau_n = \sum_{i=1}^{i=n} t_i \quad (1)$$

El costo de operación para un conjunto dado de aeronaves es:

$$Z = c_1 \times \tau_1 + c_2 \times \tau_2 + c_3 \times \tau_3 + \dots c_n \times \tau_n \quad (2)$$

Sustituyendo (1) en (2):

$$Z = c_1 \times t_1 + c_2 \times (t_1 + t_2) + c_3 \times (t_1 + t_2 + t_3) + \dots c_n \times (t_1 + t_2 + t_3 \dots t_n) \quad (3)$$

Lo que se busca es obtener el orden de atención para el cual se obtiene el menor costo de operación, entonces

En forma general se busca minimizar la siguiente función objetivo:

$$\text{Min } Z = c_1 \times \tau_1 + c_2 \times \tau_2 + c_3 \times \tau_3 + \dots c_n \times \tau_n \quad (4)$$

Para dos aeronaves (1 y 2), los costos de operación por unidad de tiempo son c_1 y c_2 ; y sus tiempos de servicio t_1 y t_2 respectivamente.

Observe que para este caso en particular sólo hay dos formas posibles de atender las aeronaves. Una es atender primero a la aeronave 1 y después a la aeronave 2 (1→2); la otra posibilidad es atender a la aeronave 2 primero y luego a la aeronave 1 (2→1).

Los costos respectivos de operación para cada caso son los siguientes:

$$\text{Para } 1 \rightarrow 2; \quad (C_1 \times \tau_1) + (C_2 \times \tau_2) = C_1 \times t_1 + C_2 \times (t_1 + t_2)$$

$$\text{Para } 2 \rightarrow 1; \quad (C_2 \times \tau_2) + (C_1 \times \tau_1) = C_2 \times t_2 + C_1 \times (t_2 + t_1)$$

Como se aprecia, el orden en que se atiende a las aeronaves repercute directamente en el costo de operación asociado.

En el caso anterior se debe elegir aquel orden en que se obtenga el menor valor del producto $C_1 \times t_1 + C_2 \times (t_1 + t_2)$ ó $C_2 \times t_2 + C_1 \times (t_2 + t_1)$.

Observe que en este caso sólo hay dos alternativas y que incluso se pueden listar fácilmente; por lo que la solución puede resolverse en una hoja de cálculo.

3.1.2 Solución exacta para tres aeronaves, sin restricciones de tiempo

En este caso, como se tienen tres aeronaves ($N = 3$), se presentan seis formas posibles de atención (es decir $3!$). Las posibles secuencias de atención son:

$$\left\{ \begin{array}{l} 1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \\ 1 \rightarrow 3 \rightarrow 2 \\ 2 \rightarrow 1 \rightarrow 3 \\ 2 \rightarrow 3 \rightarrow 1 \\ 3 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \\ 3 \rightarrow 2 \rightarrow 1 \end{array} \right.$$

Los costos respectivos de operación para cada caso se listan a continuación.

$$\text{Para } 1 \rightarrow 2 \rightarrow 3; [C_1 \times t_1] + [C_2 \times (t_1 + t_2)] + [C_3 \times (t_1 + t_2 + t_3)]$$

$$\text{Para } 1 \rightarrow 3 \rightarrow 2; [C_1 \times t_1] + [C_3 \times (t_1 + t_3)] + [C_2 \times (t_1 + t_3 + t_2)]$$

$$\text{Para } 2 \rightarrow 1 \rightarrow 3; [C_2 \times t_2] + [C_1 \times (t_2 + t_1)] + [C_3 \times (t_2 + t_1 + t_3)]$$

$$\text{Para } 2 \rightarrow 3 \rightarrow 1; [C_2 \times t_2] + [C_3 \times (t_2 + t_3)] + [C_1 \times (t_2 + t_3 + t_1)]$$

$$\text{Para } 3 \rightarrow 1 \rightarrow 2; [C_3 \times t_3] + [C_1 \times (t_3 + t_1)] + [C_2 \times (t_3 + t_1 + t_2)]$$

$$\text{Para } 3 \rightarrow 2 \rightarrow 1; [C_3 \times t_3] + [C_2 \times (t_3 + t_2)] + [C_1 \times (t_3 + t_2 + t_1)]$$

3.1.3 Solución exacta para cuatro aeronaves, sin restricciones de tiempo

En este caso se presentan 24 formas posibles de atención de las aeronaves (es decir $4!$), las cuales son:

$$1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4$$

$$1 \rightarrow 2 \rightarrow 4 \rightarrow 3$$

$$1 \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow 4$$

$$1 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 2$$

$$1 \rightarrow 4 \rightarrow 2 \rightarrow 3$$

$$1 \rightarrow 4 \rightarrow 3 \rightarrow 2$$

$$2 \rightarrow 1 \rightarrow 3 \rightarrow 4$$

$$2 \rightarrow 1 \rightarrow 4 \rightarrow 3$$

2→3→1→4
 2→3→4→1
 2→4→1→3
 2→4→3→1
 3→1→2→4
 3→1→4→2
 3→2→1→4
 3→2→4→1
 3→4→1→2
 3→4→2→1
 4→1→2→3
 4→1→3→2
 4→2→1→3
 4→2→3→1
 4→3→1→2
 4→3→2→1

Los costos respectivos de operación para cada caso son:

Para 1→2→3→4: $(C_1 \times t_1) + [(C_2 \times (t_1 + t_2)) + [C_3 \times (t_1 + t_2 + t_3)] + [C_4 \times (t_1 + t_2 + t_3 + t_4)]$
 Para 1→2→4→3: $(C_1 \times t_1) + [(C_2 \times (t_1 + t_2)) + [C_4 \times (t_1 + t_2 + t_4)] + [C_3 \times (t_1 + t_2 + t_4 + t_3)]$
 Para 1→3→2→4: $(C_1 \times t_1) + [(C_3 \times (t_1 + t_3)) + [C_2 \times (t_1 + t_3 + t_2)] + [C_4 \times (t_1 + t_3 + t_2 + t_4)]$
 Para 1→3→4→2: $(C_1 \times t_1) + [(C_3 \times (t_1 + t_3)) + [C_4 \times (t_1 + t_3 + t_4)] + [C_2 \times (t_1 + t_3 + t_4 + t_2)]$
 Para 1→4→2→3: $(C_1 \times t_1) + [(C_4 \times (t_1 + t_4)) + [C_2 \times (t_1 + t_4 + t_2)] + [C_3 \times (t_1 + t_4 + t_2 + t_3)]$
 Para 1→4→3→2: $(C_1 \times t_1) + [(C_4 \times (t_1 + t_4)) + [C_3 \times (t_1 + t_4 + t_3)] + [C_2 \times (t_1 + t_4 + t_3 + t_2)]$
 Para 2→1→3→4: $(C_2 \times t_2) + [(C_1 \times (t_2 + t_1)) + [C_3 \times (t_2 + t_1 + t_3)] + [C_4 \times (t_2 + t_1 + t_3 + t_4)]$
 Para 2→1→4→3: $(C_2 \times t_2) + [(C_1 \times (t_2 + t_1)) + [C_4 \times (t_2 + t_1 + t_4)] + [C_3 \times (t_2 + t_1 + t_4 + t_3)]$
 Para 2→3→1→4: $(C_2 \times t_2) + [(C_3 \times (t_2 + t_3)) + [C_1 \times (t_2 + t_3 + t_1)] + [C_4 \times (t_2 + t_3 + t_1 + t_4)]$
 Para 2→3→4→1: $(C_2 \times t_2) + [(C_3 \times (t_2 + t_3)) + [C_4 \times (t_2 + t_3 + t_4)] + [C_1 \times (t_2 + t_3 + t_4 + t_1)]$
 Para 2→4→1→3: $(C_2 \times t_2) + [(C_4 \times (t_2 + t_4)) + [C_1 \times (t_2 + t_4 + t_1)] + [C_3 \times (t_2 + t_4 + t_1 + t_3)]$
 Para 2→4→3→1: $(C_2 \times t_2) + [(C_4 \times (t_2 + t_4)) + [C_3 \times (t_2 + t_4 + t_3)] + [C_1 \times (t_2 + t_4 + t_3 + t_1)]$
 Para 3→1→2→4: $(C_3 \times t_3) + [(C_1 \times (t_3 + t_1)) + [C_2 \times (t_3 + t_1 + t_2)] + [C_4 \times (t_3 + t_1 + t_2 + t_4)]$
 Para 3→1→4→2: $(C_3 \times t_3) + [(C_1 \times (t_3 + t_1)) + [C_4 \times (t_3 + t_1 + t_4)] + [C_2 \times (t_3 + t_1 + t_4 + t_2)]$
 Para 3→2→1→4: $(C_3 \times t_3) + [(C_2 \times (t_3 + t_2)) + [C_1 \times (t_3 + t_2 + t_1)] + [C_4 \times (t_3 + t_2 + t_1 + t_4)]$
 Para 3→2→4→1: $(C_3 \times t_3) + [(C_2 \times (t_3 + t_2)) + [C_4 \times (t_3 + t_2 + t_4)] + [C_1 \times (t_3 + t_2 + t_4 + t_1)]$
 Para 3→4→1→2: $(C_3 \times t_3) + [(C_4 \times (t_3 + t_4)) + [C_1 \times (t_3 + t_4 + t_1)] + [C_2 \times (t_3 + t_4 + t_1 + t_2)]$
 Para 3→4→2→1: $(C_3 \times t_3) + [(C_4 \times (t_3 + t_4)) + [C_2 \times (t_3 + t_4 + t_2)] + [C_1 \times (t_3 + t_4 + t_2 + t_1)]$
 Para 4→1→2→3: $(C_4 \times t_4) + [(C_1 \times (t_4 + t_1)) + [C_2 \times (t_4 + t_1 + t_2)] + [C_3 \times (t_4 + t_1 + t_2 + t_3)]$
 Para 4→1→3→2: $(C_4 \times t_4) + [(C_1 \times (t_4 + t_1)) + [C_3 \times (t_4 + t_1 + t_3)] + [C_2 \times (t_4 + t_1 + t_3 + t_2)]$
 Para 4→2→1→3: $(C_4 \times t_4) + [(C_2 \times (t_4 + t_2)) + [C_1 \times (t_4 + t_2 + t_1)] + [C_3 \times (t_4 + t_2 + t_1 + t_3)]$
 Para 4→2→3→1: $(C_4 \times t_4) + [(C_2 \times (t_4 + t_2)) + [C_3 \times (t_4 + t_2 + t_3)] + [C_1 \times (t_4 + t_2 + t_3 + t_1)]$
 Para 4→3→1→2: $(C_4 \times t_4) + [(C_3 \times (t_4 + t_3)) + [C_1 \times (t_4 + t_3 + t_1)] + [C_2 \times (t_4 + t_3 + t_1 + t_2)]$
 Para 4→3→2→1: $(C_4 \times t_4) + [(C_3 \times (t_4 + t_3)) + [C_2 \times (t_4 + t_3 + t_2)] + [C_1 \times (t_4 + t_3 + t_2 + t_1)]$

Para 5→3→1→4→2: $(C_5 \times t_5) + [C_3 \times (t_5 + t_3)] + [C_1 \times (t_5 + t_3 + t_1)] + [C_4 \times (t_5 + t_3 + t_1 + t_4)] + [C_2 \times (t_5 + t_3 + t_1 + t_4 + t_2)]$
 Para 5→3→2→1→4: $(C_5 \times t_5) + [C_3 \times (t_5 + t_3)] + [C_2 \times (t_5 + t_3 + t_2)] + [C_1 \times (t_5 + t_3 + t_2 + t_1)] + [C_4 \times (t_5 + t_3 + t_2 + t_1 + t_4)]$
 Para 5→3→2→4→1: $(C_5 \times t_5) + [C_3 \times (t_5 + t_3)] + [C_2 \times (t_5 + t_3 + t_2)] + [C_4 \times (t_5 + t_3 + t_2 + t_4)] + [C_1 \times (t_5 + t_3 + t_2 + t_4 + t_1)]$
 Para 5→3→4→1→2: $(C_5 \times t_5) + [C_3 \times (t_5 + t_3)] + [C_4 \times (t_5 + t_3 + t_4)] + [C_1 \times (t_5 + t_3 + t_4 + t_1)] + [C_2 \times (t_5 + t_3 + t_4 + t_1 + t_2)]$
 Para 5→3→4→2→1: $(C_5 \times t_5) + [C_3 \times (t_5 + t_3)] + [C_4 \times (t_5 + t_3 + t_4)] + [C_2 \times (t_5 + t_3 + t_4 + t_2)] + [C_1 \times (t_5 + t_3 + t_4 + t_2 + t_1)]$
 Para 5→4→1→2→3: $(C_5 \times t_5) + [C_4 \times (t_5 + t_4)] + [C_1 \times (t_5 + t_4 + t_1)] + [C_2 \times (t_5 + t_4 + t_1 + t_2)] + [C_3 \times (t_5 + t_4 + t_1 + t_2 + t_3)]$
 Para 5→4→1→3→2: $(C_5 \times t_5) + [C_4 \times (t_5 + t_4)] + [C_1 \times (t_5 + t_4 + t_1)] + [C_3 \times (t_5 + t_4 + t_1 + t_3)] + [C_2 \times (t_5 + t_4 + t_1 + t_3 + t_2)]$
 Para 5→4→2→1→3: $(C_5 \times t_5) + [C_4 \times (t_5 + t_4)] + [C_2 \times (t_5 + t_4 + t_2)] + [C_1 \times (t_5 + t_4 + t_2 + t_1)] + [C_3 \times (t_5 + t_4 + t_2 + t_1 + t_3)]$
 Para 5→4→2→3→1: $(C_5 \times t_5) + [C_4 \times (t_5 + t_4)] + [C_2 \times (t_5 + t_4 + t_2)] + [C_3 \times (t_5 + t_4 + t_2 + t_3)] + [C_1 \times (t_5 + t_4 + t_2 + t_3 + t_1)]$
 Para 5→4→3→1→2: $(C_5 \times t_5) + [C_4 \times (t_5 + t_4)] + [C_3 \times (t_5 + t_4 + t_3)] + [C_1 \times (t_5 + t_4 + t_3 + t_1)] + [C_2 \times (t_5 + t_4 + t_3 + t_1 + t_2)]$
 Para 5→4→3→2→1: $(C_5 \times t_5) + [C_4 \times (t_5 + t_4)] + [C_3 \times (t_5 + t_4 + t_3)] + [C_2 \times (t_5 + t_4 + t_3 + t_2)] + [C_1 \times (t_5 + t_4 + t_3 + t_2 + t_1)]$

Ocupando las fórmulas señaladas en los incisos anteriores es posible mediante una hoja de cálculo obtener las soluciones exactas sin restricciones, de la secuencia de atención de las aeronaves que ofrece el costo de operación mínimo.

3.1.5 Solución para más de cinco aeronaves

El enfoque utilizado para el caso de más de cinco aeronaves utiliza un algoritmo heurístico que se fundamenta en tres principios. Dichos principios fueron establecidos con base en el comportamiento observado en el orden de atención al atender colas de dos, tres cuatro y cinco aeronaves. En todos estos casos fueron aplicadas las ecuaciones señaladas en los incisos 3.1.1 a 3.1.4 en donde los tres principios fueron verificados. Además, los resultados mostraron que aplicando estos principios no sólo es posible reducir los costos de operación y las demoras de los pasajeros, sino también obtener sus valores mínimos.

Principio uno: Considere un grupo de n-1 aeronaves, en cuyo caso es conocida la secuencia de atención que produce el costo de operación mínimo. Suponga que posteriormente una aeronave n es agregada a la cola, el orden de atención que presenta el costo de operación mínimo para este nuevo grupo corresponde a alguna de las n alternativas en las cuales la aeronave n es colocada al inicio, entre o al final de la secuencia que produce inicialmente el costo de operación mínimo (para las n-1 aeronaves).

Por ejemplo, considere que hay tres aeronaves A, B y C; y que la secuencia de atención que produce el costo de operación mínimo es A→B→C. Después, considere que una cuarta aeronave D es agregada. Entonces el orden de atención que presenta el costo de operación mínimo, para este nuevo grupo, corresponde a alguna de las siguientes cuatro alternativas:

D→A→B→C
 A→D→B→C
 A→B→D→C
 A→B→C→D

Este principio abre la posibilidad de obtener la secuencia que ofrece el costo de operación mínimo, en una forma rápida y sin enumerar y calcular todas las posibilidades. En el caso anterior es necesario calcular los valores para sólo cuatro

casos, aunque hay un total de 24 alternativas. Esto significa que 20 casos (83.33%) son descartados.

Este principio presenta más ventajas cuando hay más aeronaves en la línea de espera. Por ejemplo, para cinco aeronaves, 95.83% de las alternativas ($1-(n/n!)$) son descartadas; y para nueve aeronaves, 99.99% de los casos son descartados. Estas cifras señalan las ventajas de aplicar este principio.

Principio dos: El orden de atención que genera el costo de operación máximo es el orden inverso de la secuencia que corresponde al costo de operación mínimo.

Por ejemplo, si el costo de operación mínimo corresponde a la secuencia A,B,C,... N, entonces el orden inverso de dicha secuencia (N,... C,B,A) genera el costo de operación máximo.

Principio tres: El valor del costo de operación promedio de todas las alternativas es la media entre el valor mínimo y máximo.

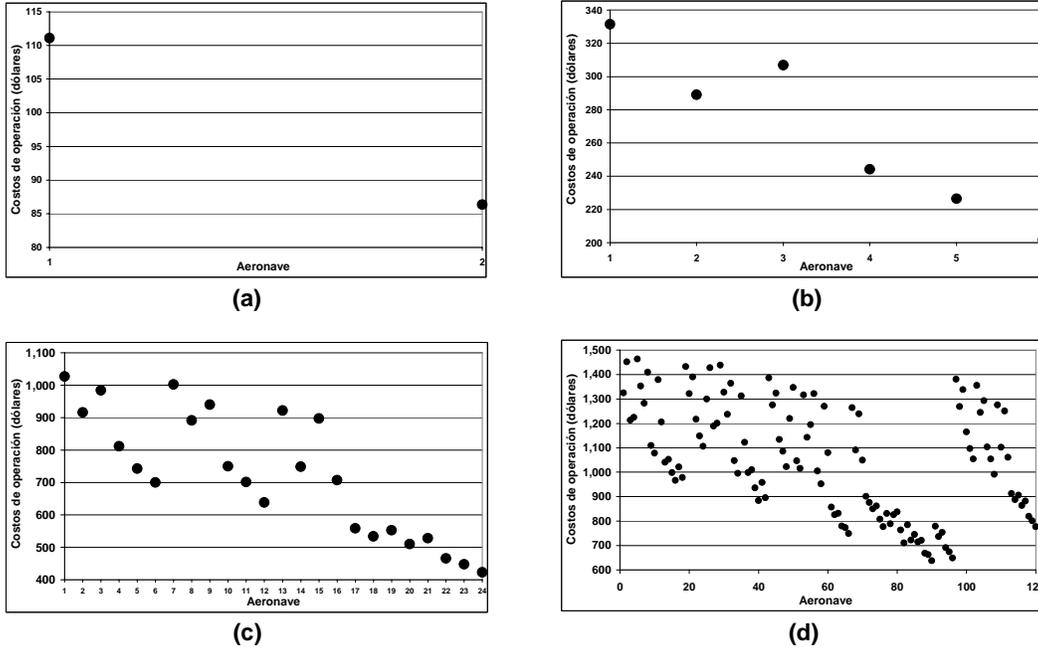
Por ejemplo, utilizando las ecuaciones obtenidas para colas de dos, tres, cuatro y cinco aeronaves; y los datos de la Tabla 2.1, es posible obtener los respectivos costos de operación. Algunos resultados para dichos tamaños de líneas de espera se muestran en la Figura 3.1.

En todos los casos en el eje Y se grafica el costo de operación (en dólares), y en el eje X el número de la secuencia de atención.

Lo que se observa es que son valores dispersos dentro de un rango determinado. Sin embargo, si se ordenan de acuerdo con su costo de operación, se obtienen las gráficas de la Figura 3.2. Al observar las gráficas anteriores se detecta que en apariencia presentan simetría.

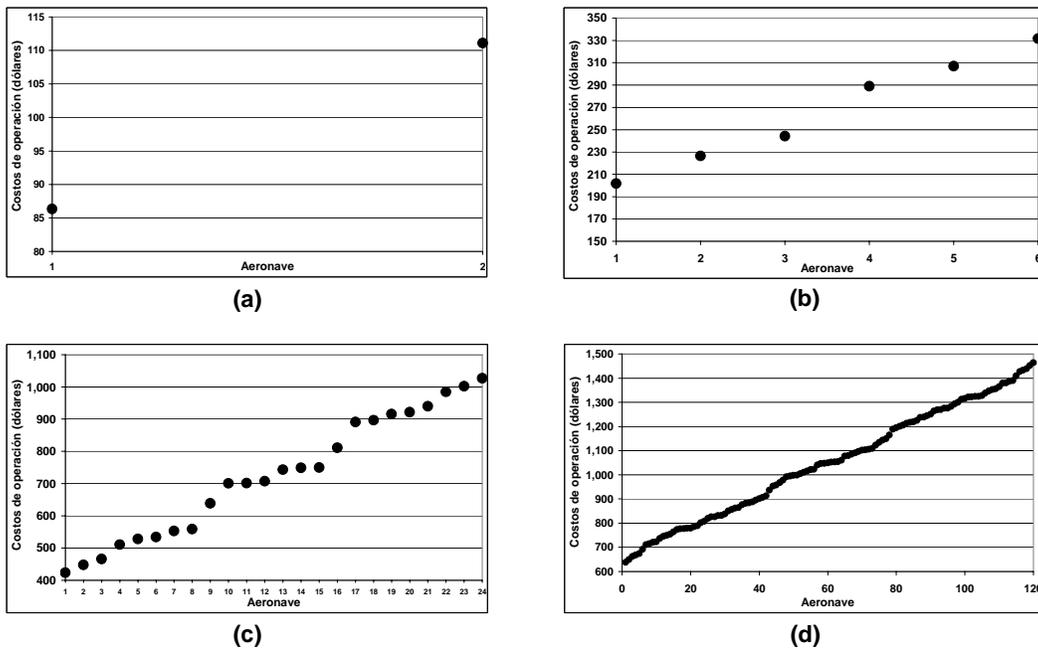
Para verificar lo anterior se obtuvieron las diferencias entre cada par de valores sucesivos y después, de la tabla obtenida, al primer valor fue restado el último, al segundo el penúltimo, y así sucesivamente. Como resultado se obtuvo una tabla con ceros, lo que significa que todas las gráficas presentan simetría.

Por lo tanto, con sólo conocer el valor máximo y mínimo de cada grupo de valores se obtiene el valor promedio del conjunto de datos.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.1 Costos de operación para líneas de espera de dos (a), tres (b), cuatro (c) y cinco aeronaves (d)



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.2 Costos de operación ordenados, para líneas de espera de dos (a), tres (b), cuatro (c) y cinco aeronaves (d)

3.2 Solución para el caso de las demoras de pasajeros

Al utilizar el procedimiento anterior es posible obtener el orden de atención que genera el valor mínimo de las demoras de los pasajeros (por ejemplo, en términos de pasajeros-minuto), si en lugar del costo de operación unitario (c_i) es utilizado el número de pasajeros en cada aeronave (p_i).

La demora de los pasajeros (DP) para un grupo de aeronaves A, B, C, ...N, es:

$$DP_{A,B,C,\dots,N} = p_B(t_A) + p_C(t_A+t_B) + \dots p_N(t_A+t_B+t_C+\dots t_{N-1}) \quad (5)$$

Observe como esta ecuación tiene la misma estructura que la obtenida para los costos de operación (ver secciones 3.1.1 a 3.1.4). Por lo tanto, los tres principios señalados antes, en forma equivalente, aplican a las demoras de los pasajeros.

4 Aplicación de la estrategia para cuantificar los beneficios

La metodología señalada anteriormente fue aplicada para determinar los beneficios potenciales de reordenar la secuencia de atención de las aeronaves, durante sus despegues y aterrizajes en un aeropuerto hipotético. Los beneficios fueron cuantificados en términos de la reducción de los costos de operación y de las demoras de pasajeros.

Se supuso que las colas se formaron en un periodo muy corto, de menos de un minuto y que, aproximadamente, 50% de las operaciones correspondían a despegues y 50% a aterrizajes. Se consideraron líneas de espera de cinco y diez aeronaves cada una. Se consideró que los valores promedio de los costos de operación y de las demoras de los pasajeros correspondían a la política actual de atención (FCFS), ya que existe una tendencia hacia estos valores cuando un grupo de operaciones se realiza en forma aleatoria; y además que los valores obtenidos con el algoritmo heurístico, correspondían a la estrategia propuesta. La información de los costos de operación unitarios, número de asientos de las aeronaves y duración promedio de las operaciones fueron tomadas de la Tabla 2.1.

4.1 Costos de operación para cinco aeronaves

La Tabla 4.1 muestra los resultados para el caso de los costos de operación. En este caso fueron considerados grupos de cinco aeronaves en diferentes proporciones de acuerdo con su clasificación por estela de turbulencia (pequeña, grande y pesada). Dado que cada grupo está constituido por cinco aeronaves, la unidad mínima de incremento fue de 20% (1/5).

Observe que todas las posibles combinaciones de las tres clases de aeronaves fueron consideradas. El orden en la tabla se estableció con base en la octava columna, la cual muestra la reducción de los costos de operación, considerando la estrategia propuesta en lugar de la política actual de atención (FCFS). Es importante señalar que el tiempo total de servicio tuvo un rango de entre cuatro minutos 37 segundos y seis minutos 36 segundos.

En relación con la secuencia de atención que reduce los costos de operación y las demoras, los resultados mostraron que en todos los casos estos grupos de aeronaves están ordenados de acuerdo con sus clases, y que la secuencia de atención para cada una siguió la prioridad de pesada, grande y pequeña.

También se observó que en la mayoría de los casos, dentro de la misma clase de aeronaves, los valores más altos de c_i para los costos de operación, y de p_i para las demoras, correspondieron generalmente a las aeronaves que fueron atendidas inicialmente.

Tabla 4.1 Costos de operación obtenidos para una cola de cinco aeronaves considerando la política actual (FCFS) y la estrategia propuesta.

Porcentaje de aeronaves en la cola, clasificadas por estela de turbulencia (%)			Costos de operación (dólares)			Tiempo de operación promedio (segundos)	Diferencia entre el costo de operación de la política actual y la propuesta	
Pequeña	Grande	Pesada	Mínimo	Promedio	Máximo		Dólares	Porcentaje
100	0	0	427.70	461.84	495.98	396.0	34.14	7.39%
0	100	0	812.55	877.17	941.78	332.2	64.61	7.37%
80	20	0	437.68	534.38	631.07	382.9	96.70	18.10%
20	80	0	696.82	809.92	923.02	346.7	113.10	13.96%
60	40	0	488.59	614.37	740.15	369.9	125.78	20.47%
40	60	0	584.04	723.17	862.29	358.3	139.12	19.24%
0	0	100	1705.28	1949.84	2194.40	280.0	244.56	12.54%
0	80	20	908.69	1201.48	1494.28	326.4	292.79	24.37%
20	60	20	764.63	1133.32	1502.00	338.0	368.68	32.53%
40	40	20	643.04	1041.74	1440.44	346.4	398.70	38.27%
80	0	20	528.45	933.08	1337.71	374.7	404.63	43.37%
0	20	80	1468.76	1876.17	2283.59	293.3	407.41	21.72%
60	20	20	585.25	998.08	1410.91	361.6	412.83	41.36%
0	60	40	1074.67	1497.32	1919.97	317.7	422.65	28.23%
20	40	40	921.09	1421.04	1920.98	326.1	499.94	35.18%
20	0	80	1367.46	1875.46	2383.47	305.4	508.01	27.09%
0	40	60	1256.34	1768.47	2280.60	305.3	512.13	28.96%
40	20	40	846.86	1393.57	1940.27	338.1	546.71	39.23%
60	0	40	782.77	1366.69	1950.62	353.3	583.92	42.73%
20	20	60	1160.28	1758.97	2357.66	317.3	598.69	34.04%
40	0	60	1079.69	1745.74	2411.79	329.3	666.05	38.15%

Fuente: Elaboración propia con base en la metodología establecida.

4.2 Demoras por pasajero para cinco aeronaves

Siguiendo la misma estructura utilizada para los costos de operación, la Tabla 4.2 muestra los resultados para las demoras, en términos de pasajero-minuto.

Tabla 4.2 Demoras para una cola de cinco aeronaves considerando la política actual (FCFS) y la estrategia propuesta.

Porcentaje de aeronaves en la cola, clasificadas por estela de turbulencia (%)			Demoras (pasajero-minuto)			Tiempo de operación promedio (segundos)	Diferencia entre la demora de la política actual y la propuesta	
Pequeña	Grande	Pesada	Mínima	Promedio	Máxima		Pasajeros-minuto	Porcentaje
100	0	0	281.13	406.76	532.38	396.0	125.63	30.88%
0	100	0	1,222.23	1,457.32	1,692.41	323.5	235.09	16.13%
80	20	0	343.36	674.16	1,004.96	382.2	330.80	49.07%
20	80	0	858.43	1,253.47	1,648.52	340.7	395.04	31.52%
0	0	100	2,740.91	3,184.93	3,628.94	277.0	444.01	13.94%
40	60	0	584.02	1,039.08	1,494.15	354.2	455.06	43.79%
60	40	0	409.45	880.40	1,351.35	368.4	470.95	53.49%
0	80	20	1,200.69	1,811.22	2,421.76	316.9	610.54	33.71%
0	20	80	1,978.28	2,696.92	3,415.56	284.4	718.64	26.65%
0	60	40	1,249.13	2,079.91	2,910.69	305.3	830.78	39.94%
20	60	20	806.17	1,644.83	2,483.50	330.4	838.67	50.99%
80	0	20	321.58	1,201.83	2,082.08	372.2	880.25	73.24%
0	40	60	1,631.33	2,559.28	3,487.23	295.9	927.95	36.26%
40	40	20	596.18	1,555.49	2,514.79	344.6	959.30	61.67%
60	20	20	395.67	1,377.06	2,358.44	358.4	981.38	71.27%
20	0	80	1,616.93	2,664.58	3,712.22	298.2	1047.65	39.32%
20	40	40	956.99	2,030.99	3,104.99	319.5	1074.00	52.88%
40	20	40	702.62	1,922.67	3,142.72	333.3	1220.05	63.46%
20	20	60	1,274.34	2,502.72	3,731.09	309.7	1228.38	49.08%
60	0	40	498.17	1,774.46	3,050.75	347.1	1276.29	71.93%
40	0	60	1,012.15	2,431.35	3,850.54	323.5	1419.19	58.37%

Fuente: Elaboración propia con base en la metodología establecida.

4.3 Costos de operación y demoras por pasajero para diez aeronaves

La Tabla 4.3 muestra los resultados para los costos de operación y la Tabla 4.4 para las demoras. Observe que en este caso fueron considerados grupos de diez aeronaves en todas sus posibles combinaciones de las tres clases de aeronaves.

Tabla 4.3 Costos de operación obtenidos para una cola de diez aeronaves considerando la política actual (FCFS) y la estrategia propuesta.

Porcentaje de aeronaves en la cola, clasificadas por estela de turbulencia (%)			Costos de operación (dólares)			Tiempo de operación promedio (segundos)	Diferencia entre el costo de operación de la política actual y la propuesta	
Pequeña	Grande	Pesada	Mínimo	Promedio	Máximo		Dólares	Porcentaje
100	0	0	1,504.10	1,693.40	1,882.70	792.0	189.30	11.18%
0	100	0	2,958.85	3,240.19	3,521.53	654.8	281.34	8.68%
90	10	0	1,579.61	1,927.26	2,274.91	783.5	347.65	18.04%
10	90	0	2,803.15	3,235.08	3,667.01	673.6	431.93	13.35%
80	20	0	1,635.24	2,132.88	2,630.51	772.6	497.64	23.33%
20	80	0	2,552.73	3,070.83	3,588.93	694.0	518.10	16.87%
70	30	0	1,685.02	2,267.64	2,850.26	753.0	582.62	25.69%
30	70	0	2,304.88	2,896.31	3,487.74	711.2	591.43	20.42%
0	90	10	3,129.51	3,752.25	4,374.98	647.2	622.73	16.60%
40	60	0	2,167.24	2,817.33	3,467.41	727.2	650.08	23.07%
50	50	0	1,909.51	2,571.24	3,232.96	730.7	661.73	25.74%
60	40	0	1,824.87	2,493.96	3,163.04	755.9	669.09	26.83%
10	80	10	2,833.01	3,615.53	4,398.04	667.6	782.52	21.64%
90	0	10	1,600.49	2,433.72	3,266.95	773.3	833.23	34.24%
0	0	100	5,812.20	6,689.73	7,567.27	554.0	877.53	13.12%
0	0	20	3,205.75	4,112.76	5,019.78	641.1	907.01	22.05%
20	70	10	2,542.74	3,456.43	4,370.13	683.4	913.70	26.43%
80	10	10	1,658.92	2,629.52	3,600.12	762.5	970.60	36.91%
30	60	10	2,385.66	3,413.33	4,440.99	702.1	1,027.67	30.11%
0	70	30	3,255.66	4,298.38	5,341.09	629.1	1,042.72	24.26%
70	20	10	1,716.62	2,772.79	3,828.96	743.6	1,056.17	38.09%
40	50	10	2,155.04	3,233.57	4,312.10	715.1	1,078.53	33.35%
10	70	20	2,873.57	3,976.45	5,079.33	656.9	1,102.88	27.74%
50	40	10	1,955.41	3,076.85	4,198.29	721.4	1,121.44	36.45%
60	30	10	1,829.43	2,951.15	4,072.88	745.1	1,121.72	38.01%
0	20	80	4,758.47	5,919.11	7,079.74	573.9	1,160.64	19.61%
0	10	90	5,495.11	6,659.68	7,824.24	567.7	1,164.56	17.49%
0	40	60	3,983.92	5,205.50	6,427.07	594.5	1,221.57	23.47%
10	60	30	3,045.71	4,284.50	5,523.30	646.5	1,238.79	28.91%
20	60	20	2,689.58	3,945.44	5,201.31	674.3	1,255.86	31.83%
0	60	40	3,594.14	4,882.63	6,171.11	621.4	1,288.48	26.39%
0	50	50	3,727.50	5,020.74	6,313.97	606.9	1,293.23	25.76%
0	30	70	4,461.50	5,808.93	7,156.36	586.8	1,347.43	23.20%
80	0	20	1,741.92	3,113.69	4,485.46	752.3	1,371.77	44.06%
30	50	20	2,426.31	3,803.96	5,181.60	690.0	1,377.65	36.22%
20	50	30	2,743.30	4,152.40	5,561.49	660.8	1,409.09	33.93%
10	10	80	4,464.96	5,902.36	7,339.75	590.2	1,437.39	24.35%
70	10	20	1,797.14	3,242.18	4,687.22	733.5	1,445.04	44.57%
40	40	20	2,262.52	3,720.27	5,178.01	705.8	1,457.74	39.18%
10	0	90	5,202.17	6,665.43	8,128.69	584.0	1,463.26	21.95%
10	30	60	3,657.79	5,137.31	6,616.82	610.1	1,479.51	28.80%
50	30	20	2,014.36	3,503.55	4,992.75	710.5	1,489.20	42.51%
60	20	20	1,920.76	3,443.19	4,965.62	735.6	1,522.43	44.22%
10	50	40	3,251.39	4,774.09	6,296.78	635.7	1,522.69	31.89%
10	40	50	3,479.63	5,006.15	6,532.66	624.1	1,526.52	30.49%
30	40	30	2,556.36	4,105.37	5,654.38	679.4	1,549.01	37.73%
10	20	70	4,191.86	5,806.33	7,420.80	603.9	1,614.47	27.81%
40	30	30	2,336.58	3,965.35	5,594.12	693.6	1,628.77	41.08%
70	0	30	1,900.41	3,531.83	5,163.25	722.0	1,631.42	46.19%
20	0	80	4,209.88	5,877.05	7,544.22	606.5	1,667.17	28.37%
50	20	30	2,127.35	3,801.21	5,475.07	699.8	1,673.86	44.03%
20	20	60	3,422.88	5,106.67	6,790.46	627.1	1,683.79	32.97%
20	40	40	3,033.02	4,741.68	6,450.34	652.9	1,708.66	36.03%
60	10	30	2,021.24	3,731.02	5,440.80	724.2	1,709.78	45.83%
20	30	50	3,190.05	4,919.22	6,648.40	639.7	1,729.17	35.15%
20	10	70	3,932.27	5,771.73	7,611.20	620.2	1,839.47	31.87%
30	10	60	3,200.94	5,056.35	6,911.76	644.8	1,855.41	36.69%
30	30	40	2,780.77	4,646.71	6,512.64	669.8	1,865.94	40.16%
30	20	50	2,987.08	4,881.94	6,776.79	658.1	1,894.85	38.81%
40	0	60	3,014.57	4,973.76	6,932.94	659.7	1,959.18	39.39%
40	20	40	2,606.83	4,568.86	6,530.89	685.5	1,962.03	42.94%
40	10	50	2,792.84	4,789.97	6,787.11	673.0	1,997.14	41.69%
50	10	40	2,378.29	4,388.35	6,398.42	691.0	2,010.06	45.80%
30	0	70	3,711.25	5,742.01	7,772.76	637.9	2,030.76	35.37%
50	0	50	2,572.17	4,615.32	6,658.47	678.5	2,043.15	44.27%
60	0	40	2,273.87	4,341.08	6,408.29	715.4	2,067.21	47.62%

Fuente: Elaboración propia con base en la metodología establecida.

Dado que cada grupo está constituido por diez aeronaves, la unidad mínima de incremento fue de 10% (1/10). El orden en ambas tablas se estableció con base en la octava columna. En este caso el tiempo total de servicio tuvo un rango de entre nueve minutos 14 segundos y trece minutos 12 segundos.

Tabla 4.4 Demoras para una cola de diez aeronaves considerando la política actual (FCFS) y la estrategia propuesta.

Porcentaje de aeronaves en la cola, clasificadas por estela de turbulencia (%)			Demoras (pasajero-minuto)			Tiempo de operación promedio (segundos)	Diferencia entre la demora de la política actual y la propuesta	
Pequeña	Grande	Pesada	Mínima	Promedio	Máxima		Pasajeros-minuto	Porcentaje
100	0	0	1,234.2	1,826.6	2,418.9	790.8	592.37	32.43%
0	100	0	5,306.7	6,246.0	7,185.3	648.0	939.30	15.04%
90	10	0	1,462.6	2,490.4	3,518.1	778.1	1,027.75	41.27%
10	90	0	4,569.1	5,827.8	7,086.4	670.7	1,258.68	21.60%
80	20	0	1,518.6	2,938.4	4,358.3	767.8	1,419.85	48.32%
20	80	0	4,115.0	5,700.2	7,285.4	686.4	1,585.20	27.81%
70	30	0	1,893.3	3,535.6	5,177.9	756.6	1,642.29	46.45%
30	70	0	3,469.7	5,182.5	6,895.2	698.9	1,712.77	33.05%
0	90	10	5,295.6	7,074.5	8,853.4	646.5	1,778.87	25.14%
0	0	100	12,083.2	13,882.0	15,680.7	554.0	1,798.78	12.96%
60	40	0	2,148.7	4,052.7	5,956.7	746.4	1,903.96	46.98%
40	60	0	3,034.5	4,941.6	6,848.6	714.2	1,907.05	38.59%
50	50	0	2,558.1	4,466.6	6,375.2	732.4	1,908.56	42.73%
10	80	10	4,794.3	6,996.7	9,199.2	662.2	2,202.45	31.48%
90	0	10	1,414.7	3,667.3	5,919.9	768.4	2,252.58	61.42%
0	10	90	10,335.3	12,734.7	15,134.0	559.5	2,399.34	18.84%
0	80	20	5,720.8	8,162.4	10,604.0	638.0	2,441.58	29.91%
20	70	10	3,983.9	6,513.8	9,043.6	675.1	2,529.87	38.84%
80	10	10	1,467.4	4,091.5	6,715.5	758.1	2,624.04	64.13%
30	60	10	3,552.4	6,345.9	9,139.5	689.6	2,793.56	44.02%
70	20	10	1,831.0	4,657.4	7,483.9	744.4	2,826.43	60.69%
0	70	30	5,795.2	8,628.9	11,462.7	624.4	2,833.74	32.84%
10	70	20	4,799.5	7,736.2	10,672.8	650.9	2,936.68	37.96%
40	50	10	2,882.2	5,823.0	8,763.8	700.6	2,940.83	50.50%
0	20	80	9,432.4	12,386.8	15,341.2	567.3	2,954.39	23.85%
60	30	10	2,036.3	5,045.6	8,054.9	734.0	3,009.34	59.64%
50	40	10	2,543.2	5,611.8	8,680.5	722.6	3,068.65	54.68%
0	30	70	8,180.3	11,288.8	14,397.4	577.6	3,108.51	27.54%
10	0	90	9,535.4	12,686.3	15,837.2	574.0	3,150.91	24.84%
0	60	40	6,449.0	9,705.3	12,961.6	614.0	3,256.30	33.55%
0	50	50	6,731.6	10,001.9	13,272.3	599.2	3,270.37	32.70%
20	60	20	4,255.8	7,597.4	10,939.1	665.8	3,341.67	43.98%
10	60	30	5,193.7	8,536.9	11,880.1	639.3	3,343.19	39.16%
0	40	60	7,624.9	11,019.1	14,413.2	590.2	3,394.15	30.80%
30	50	20	3,541.8	7,145.6	10,749.4	676.0	3,603.78	50.43%
80	0	20	1,582.1	5,199.7	8,817.2	748.4	3,617.52	69.57%
10	10	80	8,629.9	12,317.0	16,004.1	581.8	3,687.12	29.94%
10	20	70	7,395.3	11,131.3	14,867.3	589.6	3,735.97	33.56%
20	50	30	4,326.9	8,114.4	11,902.0	649.9	3,787.54	46.68%
70	10	20	1,937.3	5,733.7	9,530.0	734.7	3,796.36	66.21%
40	40	20	3,041.8	6,876.0	10,710.2	690.8	3,834.21	55.76%
10	50	40	5,479.1	9,337.0	13,194.9	624.6	3,857.90	41.32%
10	40	50	6,024.3	9,884.7	13,745.2	613.6	3,860.45	39.05%
60	20	20	2,140.0	6,088.1	10,036.2	721.8	3,948.13	64.85%
50	30	20	2,576.4	6,524.8	10,473.2	710.2	3,948.39	60.51%
10	30	60	6,689.5	10,756.4	14,823.4	602.0	4,066.94	37.81%
30	40	30	3,815.9	7,913.1	12,010.3	663.9	4,097.18	51.78%
20	0	80	7,920.0	12,223.7	16,527.3	596.3	4,303.63	35.21%
20	10	70	6,682.9	10,994.7	15,306.4	604.1	4,311.78	39.22%
40	30	30	3,169.7	7,491.4	11,813.2	676.1	4,321.74	57.69%
20	40	40	4,844.3	9,173.8	13,503.4	639.0	4,329.55	47.19%
20	30	50	5,190.5	9,565.9	13,941.2	625.4	4,375.35	45.74%
70	0	30	2,165.8	6,549.0	10,932.2	722.7	4,383.19	66.93%
50	20	30	2,791.4	7,272.7	11,754.0	695.7	4,481.31	61.62%
60	10	30	2,361.7	6,877.7	11,393.7	709.8	4,516.02	65.66%
20	20	60	5,988.1	10,556.6	15,125.2	613.9	4,568.54	43.28%
30	30	40	4,158.7	8,825.3	13,491.9	650.4	4,666.63	52.88%
30	20	50	4,623.2	9,329.4	14,035.7	637.0	4,706.26	50.45%
30	0	70	6,110.6	10,848.9	15,587.2	618.2	4,738.33	43.68%
40	20	40	3,615.8	8,530.1	13,444.3	662.8	4,914.24	57.61%
30	10	60	5,410.7	10,387.7	15,364.6	628.0	4,976.97	47.91%
40	10	50	4,077.7	9,086.2	14,094.8	651.9	5,008.58	55.12%
50	10	40	3,236.0	8,380.3	13,524.5	684.9	5,144.27	61.39%
60	0	40	2,814.8	8,021.7	13,228.6	699.0	5,206.90	64.91%
50	0	50	3,703.8	8,970.2	14,236.5	674.0	5,266.32	58.71%
40	0	60	4,869.8	10,182.8	15,495.8	643.0	5,313.02	52.18%

Fuente: Elaboración propia con base en la metodología establecida.

En relación con la secuencia de atención de atención que reduce los costos de operación y las demoras se observó en general el mismo comportamiento señalado para el caso de cinco aeronaves.

4.4 Análisis de resultados

En general cuando las colas tiene solamente una clase de aeronaves, los beneficios son más bajos que cuando hay una mezcla de distintas clases de aeronaves. Los beneficios se estimaron tanto en términos absolutos como porcentuales en función de las reducciones de los costos de operación y de las demoras de los pasajeros. En términos relativos los resultados mostraron que se pueden obtener reducciones significativas de hasta 47.6% en los costos de operación y de 73.2% en las demoras de los pasajeros, dependiendo de las diferentes proporciones de las clases de aeronaves.

Los máximos beneficios, en los costos de operación y las demoras, para el caso de cinco aeronaves se obtuvieron cuando se presentó una proporción de las aeronaves de 40% de pequeñas y 60% de pesadas; para el caso de diez aeronaves los máximos beneficios en los costos de operación correspondieron para una proporción de 60% de pequeñas y 40% de pesadas; y en relación con las demoras para 40% de pequeñas y 60% de pesadas.

El beneficio potencial es proporcional al tamaño de las colas, por ejemplo, en el caso de colas de cinco aeronaves se obtuvo una reducción en los costos de operación de hasta 666.05 dólares, pero para colas de diez aeronaves la reducción fue de hasta 2,067.21 dólares; esto significa que al duplicarse el tamaño de la cola, los beneficios se triplican. En el caso de las demoras, para las colas de cinco aeronaves se obtuvo una reducción de hasta 1,419.19 pasajero-minuto, pero para colas de diez aeronaves esta reducción fue de hasta 5,313.02 pasajero-minuto; por lo tanto, al duplicarse el tamaño de la cola, el beneficio se incrementó casi cuatro veces.

4.5 Discusión

Es importante señalar que la estrategia propuesta no reduce el tamaño de las colas, únicamente reordena la secuencia de atención de las aeronaves para reducir los costos de operación y las demoras de un mayor número de pasajeros.

Aunque los beneficios más altos obtenidos mediante la estrategia propuesta correspondieron a una mezcla de diferentes clases de aeronaves, y cuando están en una proporción 40% de pequeñas y 60% de pesadas, esto no quiere decir que se recomiende manejar dicha proporción, por el contrario, la recomendación es tener una clase homogénea de aeronaves durante los despegues y los aterrizajes. La interpretación de los hallazgos es que en aeropuertos que manejan una mezcla de distintas clases de aeronaves, es posible reducir los efectos negativos al cambiar la secuencia de atención de las aeronaves. En otras palabras, los

aeropuertos que manejan las mismas clases de aeronaves son más eficientes en términos de la capacidad de las pistas que aquellos que manejan clases heterogéneas. Por esta razón en el último caso es posible reducir significativamente los efectos negativos y beneficiar a las aerolíneas y usuarios.

Debido a que los resultados mostraron que para reducir los costos de operación y las demoras, las aeronaves más grandes deben ser atendidas primero y las más pequeñas después, se presentan dos implicaciones importantes. Por un lado, esta condición estimula la utilización de aeronaves de gran capacidad, con lo cual se puede disminuir la congestión en las pistas. Sin embargo, en contraparte dicha situación puede congestionar otras instalaciones dentro del aeropuerto. Algunos estudios señalan que el área más afectada podría ser el sistema de reclamo de equipaje (Chiu y Walton, 2002 y 2003). Por lo tanto, la aplicación de la estrategia propuesta debe considerar esta problemática.

Durante 2009, en Europa, 38% de los vuelos tuvieron demoras en sus salidas y 36% en sus llegadas. También se reportó, entre sus principales cincuenta aeropuertos afectados en las salidas, que la demora promedio por operación tuvo un rango de entre 9.3 a 18.9 minutos y para las llegadas el rango fue de 8.9 a 19.3 minutos (Eurocontrol, 2010). Adicionalmente, las estadísticas para los principales aeropuertos en el ámbito mundial, respecto a las operaciones realizadas durante 2008, muestran que 23 de estos se localizan en América (21 en Estados Unidos, y los otros en Toronto y en la Ciudad de México); seis pertenecen a Europa (Paris/Charles-De-Gaulle, Frankfurt, London/Heathrow, Madrid/Barajas, Amsterdam y Munich); y uno en Asia (Beijing) (www.aci.aero).

Debido a que mientras más operaciones se realizan en un aeropuerto hay mayor probabilidad de que se formen líneas de espera y demoras, por ejemplo, en los seis aeropuertos europeos señalados anteriormente se presentan demoras significativas (Eurocontrol, 2010). Entonces existe potencial para aplicar la estrategia propuesta en muchos aeropuertos de América, Europa y Asia.

5 Alternativas administrativas para promover la aplicación de la estrategia propuesta

Existen diversos esquemas que servirían para fomentar la política propuesta, en forma genérica se tienen tres alternativas:

- Esquema en el que cada aerolínea obtiene las reducciones o incrementos en sus costos de operación. En este esquema algunas aeronaves obtienen reducciones en sus costos de operación, pero otras tienen incrementos. Sin embargo, globalmente se tiene el menor costo de operación posible.
- Esquema en el que parte de los beneficios de las aerolíneas que obtuvieron reducciones en sus costos de operación, se transfieren hacia las aerolíneas que incrementaron sus costos de operación. En este caso la magnitud de dicha transferencia puede tener un valor máximo tal que las compañías afectadas inicialmente, mantienen el costo de operación original. Bajo esta consideración, se reducen los beneficios de las aeronaves que habían tenido inicialmente los menores costos de operación, pero a cambio, las aeronaves que los habían incrementado ahora los mantienen en su valor original.
- Una tercera posibilidad se presenta cuando una mayor parte de los ahorros en las aerolíneas beneficiadas inicialmente, se transfieren a las aerolíneas que han incrementado sus costos de operación, en un valor tal que se reducen sus costos de operación iniciales. Bajo este esquema ahora todas las aeronaves resultan beneficiadas, dado que todas reducen sus costos de operación.

El primer esquema resulta más atractivo para las aerolíneas que son atendidas al inicio de una línea de espera, pero es menos atractivo para las aerolíneas que se atienden al final. Bajo el segundo esquema, podría resultar que algunas aeronaves reduzcan sus costos de operación, las que se atienden primero, y que otras al menos no los incrementen, las que son atendidas al final, pero a cambio tienen que esperar más tiempo para ser atendidas. Por último, el tercer esquema que podría ser el más viable; aunque reduce los beneficios de las aeronaves que son atendidas al principio, también reduce los costos de operación de las últimas aeronaves.

Con objeto de ilustrar la aplicación de estas tres opciones, consideremos que hay una línea de espera formada por sólo dos aeronaves, en donde al inicio esta una aeronave ATR-42 y atrás de ella un Boeing 747, supongamos que ambas requieren aterrizar en la única pista de un aeropuerto. Utilizando la información de la Tabla 2.1 obtenemos que el costo de operación total es:

$$CO_{\text{ATR-42, Boeing747}} = 0.44969(93) + 3.76321(93+67) = 41.82 + 602.11 = 643.93 \text{ dólares}$$

Pero si se aplica la estrategia propuesta para reducir los costos de operación, la aeronave Boeing 747 debe ser atendida primero y después el ATR-42, por lo tanto el costo de operación total en este caso es:

$$CO_{\text{Boeing747,ATR-42}} = 3.76321(67) + 0.44969(67+93) = 252.13 + 71.95 = 324.08 \text{ dólares}$$

De acuerdo con la opción uno la aeronave Boeing 747 reduce sus costos de operación (de 602.11 a 252.13 dólares), y la aeronave ATR-42 los incrementa (de 41.82 a 71.95 dólares), sin embargo, ambas aeronaves como conjunto reducen su costo de operación total de 643.93 a 324.08 dólares.

Aplicando la opción dos, parte de los beneficios económicos obtenidos por la aeronave Boeing 747 son transferidos al ATR-42, con objeto de que esta última mantenga sus costos de operación originales. En este caso, el Boeing 747 debe transferir 30.13 dólares (71.95 - 41.82) al ATR-42; por lo tanto, el Boeing 747 tiene un costo de operación de 282.26 dólares (252.13 + 30.13).

Finalmente, si se aplica la opción tres, la aeronave Boeing 747 debe transferir 71.95 dólares a la ATR-42, lo cual se traduce en que para esta última su costo de operación sea igual a cero. Sin embargo, ahora el costo de operación para el Boeing 747 es de 324.08 dólares; mediante esta opción ambas aeronaves se benefician debido a que las dos reducen sus costos de operación. El Boeing 747 reduce su costo de 602.11 a 324.08 dólares y el ATR-42 reduce su costo de operación de 41.82 a cero dólares.

La factibilidad de cada esquema depende de los distintos tipos y cantidades de aeronaves en la línea de espera que se presenten en cada aeropuerto.

6 Conclusiones y recomendaciones

El enfoque utilizado para resolver el problema es un procedimiento simplificado que obtiene la secuencia de atención de las aeronaves para reducir los costos de operación y las demoras de los pasajeros, sin la necesidad de enumerar todas las posibles alternativas. La ventaja de este enfoque es que no requiere de una gran cantidad de tiempo para obtener la solución.

La estrategia propuesta no reduce los tamaños de las colas, solamente reordena la secuencia de atención.

En caso de reestructurar la atención de aeronaves con el esquema que minimiza los costos de operación de las aeronaves o las demoras de los pasajeros, se obtendrían beneficios significativos para ambos, pasajeros y aerolíneas. En general se abriría la posibilidad de obtener los siguientes beneficios públicos (1 a 4) y privados (5 a 7):

- 1 Mejorar el servicio a los pasajeros, al reducir para más usuarios los tiempos de espera.
- 2 Mejorar la seguridad de una mayor cantidad de pasajeros, al exponerlos durante menos tiempo a las fases más peligrosas de la operación aérea³, los despegues y los aterrizajes. Durante dichas fases, en la aviación comercial mundial de aeronaves a reacción, se han presentado 37% de los accidentes fatales durante el periodo 1999-2008 (Boeing, 2009).
- 3 Afectar en un menor grado al ambiente⁴, al reducir el tiempo de operación de los motores de las aeronaves que producen los mayores volúmenes de emisiones contaminantes⁵ y ruido.

³ En el ámbito nacional y dentro de la aviación comercial se ha observado que cerca del 60% de los accidentes aéreos se presentan durante las fases de despegue y aterrizaje. Fuente: Herrera, 2000 (p. 44).

⁴ Contribuyendo con ello al cumplimiento del objetivo número 10 (Reducir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero, GEI), del Eje de política pública No. 4 (Sustentabilidad ambiental), del Plan Nacional de Desarrollo (PND) 2007-2012. Dicho objetivo del PND está vinculado con el Programa Sectorial de Comunicaciones y Transportes 2007-2012, como un objetivo transversal. Referencia: SCT, 2008 (pp. 25 y 26). Se estima que en 2002 México generó el equivalente a 643,183 millones de toneladas de CO₂, volumen que lo sitúa dentro de los 15 principales países emisores, con una contribución de alrededor de 1.5% de las emisiones globales. En lo que respecta a las fuentes responsables de emisiones, corresponde 18% al transporte. Como signatario del Protocolo de Kyoto, México tiene el compromiso de reducir las emisiones de GEI. Por ello, el PND establece dentro de las acciones relacionadas con el transporte, en la Estrategia 10.1: "...integrar políticas de promoción de transporte público bajo en emisiones y fomentar la investigación en tecnologías de menor intensidad energética"; y en la Estrategia 10.2 "Promover el uso eficiente de energía en el ámbito doméstico, industrial, agrícola y de transporte." Referencia: Gobierno de los Estados Unidos Mexicanos. Presidencia de la República, 2007 (pp. 259-260).

- 4 Reducir las tarifas de servicio aéreo y/o
- 5 Incrementar las utilidades de las aerolíneas.
- 6 Reducir los costos de operación de las aeronaves durante las fases de despegue y aterrizaje.
- 7 Obtener ahorros en el consumo de combustible de las aeronaves.

Otro beneficio de la reducción del tiempo de espera de las aeronaves, es el ahorro del tiempo de los pasajeros en términos económicos (para su estimación ver Fernández, 2009, pp. 85-91; y Alberro-Semerena, 2008, pp. 211-223).

Los resultados al aplicar la estrategia propuesta muestran que se pueden obtener reducciones significativas de hasta 47.6% en los costos de operación y de 73.2% en las demoras de los pasajeros. La magnitud de los beneficios depende de la proporción de las distintas clases de aeronaves que operan en un aeropuerto determinado. En general, los mayores beneficios se obtienen cuando se presenta una mezcla de diferentes clases de aeronaves.

También se observó que para reducir los costos de operación y las demoras de los pasajeros, generalmente las aeronaves más grandes deben ser atendidas primero y las más pequeñas al final. Esta condición propicia la utilización de aeronaves de grandes dimensiones, sin embargo, esto puede generar la congestión de otras instalaciones de procesamiento en algún subsistema del aeropuerto, por ejemplo, en el de reclamo de equipaje.

Existe potencial para aplicar la estrategia propuesta en muchos aeropuertos de América, Europa y Asia.

Se consideraron tres políticas administrativas que pueden promover la estrategia propuesta. Aparentemente, la tercera opción, en la cual todas las aeronaves reducen sus costos de operación, es la más viable. Aunque la factibilidad de cada opción depende de las cantidades y proporciones de las distintas clases de aeronaves presentes en las líneas de espera de cada aeropuerto.

⁵ La utilización de las aeronaves no había causado preocupación como una fuente de emisiones que generan el efecto invernadero (GEI), debido a las rápidas mejoras que se habían obtenido en la eficiencia de los motores de las aeronaves. Sin embargo, estudios a principios de los noventas mostraron que las emisiones de NOx de las aeronaves podrían actuar como un precursor significativo de GEI, dado que producen cerca de 35 veces el efecto de las emisiones generadas al nivel del suelo. Esto combinado con el rápido y sostenido crecimiento de la aviación, y el estancamiento de las mejoras en la eficiencia de los motores turbo reactores, ha conducido a organizaciones internacionales a preocuparse más por los impactos ambientales de la aviación. Fuente: *Michaelis*, 1996 (p. 9).

Aparentemente el algoritmo heurístico propuesto no sólo reduce los costos de operación y las demoras de los pasajeros, sino que los minimiza, sin embargo, esta demostración queda pendiente.

Aunque fueron cuantificados los beneficios potenciales de aplicar la estrategia propuesta, se planea para un trabajo futuro, vincularla con un modelo de simulación con objeto de estimar los beneficios, no sólo en un determinado tamaño de cola, sino en un día de operación típico para obtener cifras que soporten la implementación de la estrategia. El modelo propuesto permitirá establecer los tamaños de las colas y su composición considerando las diferentes clases de aeronaves.

Además, queda pendiente el desarrollo de los procedimientos de control de tránsito aéreo para atender las aeronaves de acuerdo con la estrategia propuesta.

Bibliografía

Alberro-Semerena, José. 2008. Costo de oportunidad social del tiempo de usuarios del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México. *El Trimestre Económico*, enero-marzo de 2008, vol. LXXV (1), núm. 297. México.

Boeing Commercial Airplanes. Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents. Worldwide Operations 1959 – 2008. July 2009. USA.

Chiu Chiung-Yu y Walton C. Michel. 2002. Integrated simulation method to evaluate the impact of new large aircraft on passenger flows at airport terminals. Transportation Research Record. *Journal of the Transportation Research Board*. 2002. No. 1788. Transportation Research Board, Washington, DC. USA.

Chiu Chiung-Yu y Walton C. Michel. 2003. Impacts of new large aircraft on passenger flows at international airport terminals. Research Report SWUTC/03/167530-1. Southwest Region University Transportation Center. Center for Transportation Research. University of Texas at Austin. Austin, Texas. USA.

Eurocontrol. 2010. Central Office for Delay Analysis (CODA) Digest – Delays to Air Transport in Europe. Annual 2009. pp. 3, 16, 18, 19 y 21.

Fernández Candás Ruperto. Optimización de la asignación de aeronaves a puertas de embarque en aeropuertos considerando el tiempo de rodadura. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España. 2009. ISBN: 978-84-692-2862-3.

Gobierno de los Estados Unidos Mexicanos. Presidencia de la República. Plan Nacional de Desarrollo 2007-2012. México. 2007.

Herrera García, Alfonso. 2000. Elementos para el análisis de la seguridad en el transporte aéreo comercial en México. Publicación Técnica No. 152, Instituto Mexicano del Transporte. México. 2000.

Herrera-García, Alfonso y Moreno-Quintero, Eric. [en línea]. Strategy for Attending Takeoffs and Landings to Reduce the Aircraft Operating Costs and the Passenger Delays. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*. Issue 11(2). April 2011. Disponible en: www.ejtir.tbm.tudelft.nl. ISSN 1567-7141.

Michaelis Laurie. OECD, Annex I Expert Group on the UN FCCC, Policies and Measures for Common Action. Francia. 1996.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Dirección General de Aeronáutica Civil. La Aviación Mexicana en Cifras 1989-2006. México. 2007.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Programa Sectorial de Comunicaciones y Transportes 2007-2012. México. 2008.

Servicios a la Navegación en el Espacio Aéreo Mexicano (SENEAM). Publicación de Información Aeronáutica (PIA). Enmienda 01/08 (363). México. 2008.

Walpole Ronald E y Myers Raymond H. Probabilidad y estadística. Mc Graw Hill. México. 1991.

<http://www.aci.aero>

http://www.iata.org/whatwedo/economics/fuel_monitor/price_development.htm

<http://www.icao.int/icao/en/ro/allpirg/allpirg4/wp28app.pdf>

CIUDAD DE MÉXICO

Av. Nuevo León 210
Col. Hipódromo Condesa
CP 06100, México, D F
Tel +52 (55) 52 653600
Fax +52 (55) 52 653600

SANFANDILA

Carretera Querétaro-Galindo km 12+000
CP 76700, Sanfandila
Pedro Escobedo, Querétaro, México
Tel +52 (442) 216 9777
Fax +52 (442) 216 9671



**INSTITUTO
MEXICANO DEL
TRANSPORTE**



www.imt.mx
publicaciones@imt.mx