



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería.

Doctorado en Ingeniería

Desarrollo de un modelo de simulación de operaciones aeroportuarias del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, como herramienta de planeación y evaluación cuantitativa de cambios operativos.

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Doctor en Ingeniería

Presenta:

M. en I. Alfonso Herrera García

Dirigido por:

Dr. Carlos Daniel Martner Peyrelongue

SINODALES

Dr. Carlos Daniel Martner Peyrelongue
Presidente


Firma

Dra. Rebeca del Rocío Peniche Vera
Secretario


Firma

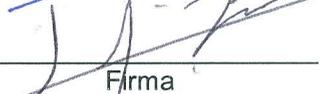
Dr. Eduardo Betanzo Quezada
Vocal


Firma

Dr. Eric Moreno Quintero
Suplente


Firma

Dr. Saúl Antonio Obregón Biosca
Suplente


Firma


Dr. Aurelio Domínguez González
Director de la Facultad


Dr. Irineo Torres Pacheco
Director de Investigación y Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Febrero, 2013
México

Desarrollo de un modelo de simulación de operaciones aeroportuarias del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, como herramienta de planeación y evaluación cuantitativa de cambios operativos.

por Alfonso Herrera García

RESUMEN

El principal reto del sistema aeroportuario nacional es la enorme demanda de servicios a atender en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México. Por ello, se requiere la construcción de un nuevo aeropuerto; sin embargo, debido a diversas circunstancias, el actual deberá operar aún durante varios años, muy cerca de su capacidad máxima, condición que genera diversas dificultades y grandes retos. El objetivo de este trabajo fue generar un modelo de simulación de este aeropuerto, que considere las principales variables operativas en pistas, calles de rodaje y plataformas, para evaluar propuestas que den soporte a la toma de decisiones relacionadas con su planeación y operación. La metodología inició con la formulación del problema; después, se estableció el modelo conceptual, en el cual se definieron los aspectos que fueron representados y su nivel de detalle. El siguiente paso fue la recolección y procesamiento de datos operativos; con base en esta información se estimaron los valores de las variables y constantes que fueron utilizados para la programación del modelo, entre ellos: tasas de llegada y salida por tipo de aeronave, y capacidades de las instalaciones. Las funciones de densidad de probabilidad, para los diferentes tipos de aeronaves y operaciones, se validaron mediante pruebas de bondad de ajuste. Posteriormente, se construyó el modelo de simulación en un programa de computadora. Los resultados de las simulaciones mostraron que este aeropuerto alcanzará niveles operativos críticos en el año 2015, lo que incrementará significativamente los tamaños de las líneas de espera de las aeronaves y las demoras de los pasajeros. También que las labores de mantenimiento en pistas y las condiciones meteorológicas adversas agravan temporalmente, aunque en forma importante su operación. Además, se evaluaron algunas alternativas que podrían aliviar los problemas de saturación, por ejemplo, incrementando la capacidad de las pistas, reduciendo la demanda, incorporando nueva infraestructura, o mediante un nuevo procedimiento operacional, con el que se pueden obtener ahorros anuales de aproximadamente 28 millones de pesos. La aportación de este proyecto es el propio modelo, como herramienta de análisis; y un algoritmo para una nueva estrategia de atención de las aeronaves, aplicable a cualquier aeropuerto.

(Palabras clave: aeronave, aeropuerto, algoritmo, modelo de simulación)

SUMMARY

The main challenge of the national airport system is the huge demand of services to be attended at the Mexico City International Airport. Thus, it is required to build a new airport; however, due to several circumstances the current airport must work, close to its maximum capacity, during several years yet, but this condition creates several problems and huge challenges. The objective of this work was to create a simulation model for this airport, which considers the main operative variables at runways, taxiways and platforms, for the evaluation of proposals that support decisions about its planning and operation. The methodology initiated with the problem formulation: after, it was established the conceptual model, where the aspects represented and the level of detail were defined. The next step was the gathering and processing of operative data; using this information, the values of variables and constants used for programming the model were estimated, among them arrivals and departures rates by aircraft type, and the capacities of the facilities. The probability density functions, for the different aircraft types and movements, were validated using goodness of fit tests. After, using a computer program the simulation model was built. The results of simulations performed with the model showed that this airport will reach critical operative levels at year 2015, when the length of aircraft queues and the passenger delays will grow significantly. Also, the results showed that the maintenance labors at runways and the adverse meteorological conditions temporarily and significantly aggravate the airport operation. Additionally, some alternatives that could relieve the saturation issues were evaluated, for instance, increasing the runways capacity, reducing the demand, incorporating new infrastructure, or applying a new operational procedure that generates annual savings of 28 million pesos. The contribution of this work is the simulation model itself, as an analytical tool; and an algorithm for a new strategy for attending the aircraft, that can be applied to any airport.

(Key words: aircraft, airport, algorithm, simulation model)

AGRADECIMIENTOS.

Se agradece el apoyo brindado por la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ) y el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) para la elaboración de esta tesis. Además, se reconoce y agradece el apoyo de Servicios a la Navegación en el Espacio Aéreo Mexicano (SENEAM) y del Grupo Aeroportuario de la Ciudad de México (GACM), por el aporte de información operacional que fue vital para desarrollar este trabajo. En particular se agradecen las recomendaciones generales y el entusiasmo sembrado por los profesores del Doctorado en Ingeniería de la UAQ Irineo Torres, Carlos Fuentes, Mario Rodríguez y Rebeca del Rocío Peniche. En la revisión gramatical de los artículos publicados en inglés fue crucial el apoyo de Silvia Stroet; también se agradecen las sugerencias del corrector de estilo (anónimo) de la versión preliminar de este trabajo. La experiencia y sugerencias de personal académico especialista en transporte, en particular de Eduardo Betanzo y Saúl Obregón, sin duda mejoraron este trabajo. Las recomendaciones, aportaciones y apoyo de mis jóvenes compañeros de grupo, César Granada, Daniel Jiménez, Daniel Pérez, Luis Miguel Contreras, Moisés Vázquez, Omar Valencia y Ricardo Luna, también fueron de gran valor. En el IMT se agradece el apoyo decidido del Director General, Roberto Aguerrebere y del Coordinador de Integración del Transporte, Carlos Martner, sin su soporte no se habría llevado a cabo este proyecto. Gran parte del apoyo matemático se debe a Eric Moreno y algunas aportaciones en aspectos económicos se deben a Guillermo Torres. Algunos documentos utilizados para esta investigación, fueron obtenidos gracias a la gestión de Blanca Ordóñez, Jefa del Centro de Información y Documentación del IMT. También se agradece el apoyo y colaboración del tesista Santiago Servin, de la Universidad Autónoma de Chihuahua; y de los matemáticos de la UAQ, Eduardo Flores, Luis Varela y Wilfrido Paredes, quienes realizaron sus prácticas y residencia profesional en el IMT. Una enorme ayuda provino en cuanto a la asesoría técnica del programa de cómputo utilizado, gracias a Jorge Toucet, Director de Flexsim México, se logró reducir significativamente el tiempo para desarrollar el modelo. En el mismo sentido del manejo del programa de simulación, parte de la ayuda brindada provino de la investigadora Aurora Moreno. También, fueron de gran importancia los trámites administrativos en el IMT para el apoyo económico del doctorado, por lo que se reconoce en este sentido el trabajo de Martha Lelis. Finalmente, agradezco a todos mis compañeros de trabajo, amistades y familiares por sus palabras de aliento; en particular a mi padre, Juan, y a mis hermanos Dalia y José Luís. Desde luego, debo hacer un reconocimiento especial a mi esposa **Yesica**, por su apoyo y comprensión, espero que de alguna forma pueda retribuirle el tiempo que no pude dedicarle al desarrollar este trabajo.

ÍNDICE

RESUMEN	i
SUMMARY	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
ÍNDICE	iv
ÍNDICE DE CUADROS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
I INTRODUCCIÓN	1
I.1 Antecedentes y justificación.....	1
I.2 Los modelos de simulación.....	6
I.3 Planteamiento del problema	14
I.4 Hipótesis y objetivos	17
I.4.1 Hipótesis general.....	18
I.4.2 Objetivo general	18
I.4.3 Objetivos específicos.....	18
II REVISIÓN DE LITERATURA.....	19
II.1 Planeación y operación aeroportuaria	19
II.2 Control de tránsito aéreo	23
II.3 Aeronaves de gran capacidad	24
II.4 Resumen de la revisión bibliográfica	25
III METODOLOGÍA	26
III.1 Formulación del problema	26
III.2 Información operacional del AICM.....	29
III.2.1 Comportamiento general de las operaciones de aeronaves.....	30

III.2.2	Distribuciones empíricas de los tiempos de llegada y salida para los principales tipos de aeronaves, y pruebas de bondad de ajuste.....	38
III.3	Modelo conceptual.....	40
III.4	Construcción del modelo de simulación en un programa de cómputo.....	44
III.5	Pruebas piloto y validación del modelo.....	46
III.6	Diseño de los escenarios de simulación	49
III.6.1	Impacto originado por el crecimiento natural de la demanda de servicio ..	50
III.6.2	Efectos de las labores de mantenimiento en las pistas	53
III.6.3	Efectos de la presencia de condiciones ambientales adversas.....	54
III.6.4	Efecto de la aplicación de una nueva tecnología para incrementar la capacidad de las pistas.....	58
III.6.5	Efecto de la utilización intensiva de aeronaves de mayor capacidad	62
III.6.6	Efecto de la incorporación de infraestructura nueva.....	65
III.6.7	Impacto de una nueva estrategia para atender a las aeronaves durante las fases de despegue y aterrizaje	66
IV	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	69
IV.1	Escenario relacionado con el impacto originado por el crecimiento natural de la demanda.....	69
IV.2	Escenario para cuantificar los efectos de las labores de mantenimiento en las pistas.....	74
IV.3	Escenario para estimar los efectos de la presencia de condiciones ambientales adversas.....	77
IV.4	Escenario relacionado con el efecto de la aplicación de una nueva tecnología para incrementar la capacidad de las pistas.....	81
IV.5	Escenario para estimar el efecto de la utilización intensiva de aeronaves de mayor capacidad	85
IV.6	Escenario para cuantificar el efecto de la incorporación de infraestructura nueva.....	87

IV.7 Escenario relacionado con el impacto de una nueva estrategia para atender a las aeronaves durante las fases de despegue y aterrizaje	90
CONCLUSIONES.....	94
LITERATURA CITADA.....	99
APÉNDICE.....	104
Apéndice A.1 Aeropuertos más importantes del mundo por pasajeros transportados, movimientos realizados y carga movilizad.....	105
Apéndice A.2 Documentación del modelo de simulación del AICM.....	106
Apéndice A.3 Artículo de Herrera-García y Moreno-Quintero, 2011.....	128

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro		Página
1.1	Escasez de estudios de simulación aeroportuaria; y de planeación y operación aeroportuaria	5
2.1	Clasificación de temas para el tópico de simulación en aeropuertos	19
2.2	Resumen de la revisión bibliográfica de modelos de simulación aplicados a aeropuertos	25
3.1	Tipos y clases de aeronaves que operan diariamente en el AICM	36
3.2	Tiempos de ocupación promedio de las aeronaves en las plataformas y posiciones de atraque del AICM	37
3.3	Funciones de densidad de probabilidad para las llegadas	39
3.4	Funciones de densidad de probabilidad para las salidas	39
3.5	Velocidades promedio utilizadas en el modelo de simulación del AICM	45
3.6	Participación de los principales tipos de aeronaves en las operaciones del AICM, considerando los valores reales y los resultados del modelo de simulación	48
3.7	Funciones de densidad de probabilidad, que generan una demanda igual al 100% de la capacidad máxima de las pistas, para las llegadas	51
3.8	Funciones de densidad de probabilidad, que generan una demanda igual al 100% de la capacidad máxima de las pistas, para las salidas	51
3.9	Porcentaje de capacidad máxima de las pistas del AICM en función de las operaciones realizadas	52
3.10	Costos de operación por unidad de tiempo y número de asientos para los diferentes tipos de aeronaves que operan en el AICM	68
4.1	Comparativo de los efectos derivados de la presencia de niebla en las pistas del AICM, durante el periodo de baja actividad	78
4.2	Efectos derivados de la presencia de niebla en las pistas del AICM, durante el periodo de alta actividad	79
4.3	Niveles de demanda, para los dos periodos de actividad, y la demanda total del AICM, considerando una capacidad máxima en pistas de 120 operaciones/hora	82
4.4	Calidad de servicio cuando operan las aeronaves ATR 42 en la condición original; y cuando son sustituidas por las aeronaves ATR 72. Para el intervalo entre las 06:00 y las 24:00 horas	85

Cuadro		Página
4.5	Calidad de servicio cuando operan las aeronaves pesadas en la condición original; y cuando son sustituidas por las aeronaves A380. Para el intervalo entre las 00:00 y las 06:00 horas	86
4.6	Calidad de servicio cuando operan las aeronaves pesadas en la condición original; y cuando son sustituidas por las aeronaves A380. Para el intervalo entre las 06:00 y las 24:00 horas	87

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1.1 Caminos para la experimentación con un sistema	7
1.2 Tamaño promedio de las líneas de espera en las pistas de un aeropuerto en función de su utilización promedio	17
3.1 Pasos para la elaboración del modelo de simulación y su aplicación	26
3.2 Vista en planta del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México	28
3.3 Posiciones de atraque de las aeronaves en la Terminal 1 del AICM	28
3.4 Posiciones de atraque de las aeronaves en la Terminal 2 del AICM	29
3.5 Operaciones aéreas en el AICM (1967–2011) y tendencia	31
3.6 Operaciones diarias en el AICM durante el mes de diciembre de 2010	34
3.7 Operaciones aéreas en el AICM durante un día típico de enero de 2011	35
3.8 Modelo conceptual del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México	43
3.9 Vista en planta del modelo del AICM desarrollado	45
3.10 Perspectiva del modelo de la Terminal 1	46
3.11 Perspectiva del modelo de la Terminal 2	46
3.12 Operaciones aéreas reales en las pistas del AICM y resultados de diez pruebas con el modelo desarrollado	48
3.13 Aeronave ATR 42 a la izquierda y ATR 72 a la derecha	63
3.14 Aeronave Airbus A380	63
4.1 Tendencia de las colas y tiempos de espera en el AICM durante el intervalo entre las 00:00 y 06:00 horas	70
4.2 Tendencia de las colas y tiempos de espera en el AICM durante el intervalo entre las 06:00 y 24:00 horas	70
4.3 Pronóstico de las operaciones totales anuales en el AICM	72
4.4 Evolución del deterioro de servicio en el AICM durante el intervalo entre las 00:00 y 06:00 horas	73
4.5 Evolución del deterioro de servicio en el AICM durante el intervalo entre las 06:00 y 24:00 horas	73
4.6 Comparativo del deterioro de servicio (colas y demoras promedio) en el AICM, derivado de las labores de mantenimiento en sus pistas, cuando se realizan durante el intervalo entre las 00:00 y 06:00 horas	75

Figura	Página
4.7 Comparativo del deterioro de servicio (colas y demoras máximas) en el AICM, derivado de las labores de mantenimiento en sus pistas, cuando se realizan durante el intervalo entre las 00:00 y 06:00 horas	75
4.8 Comparativo del deterioro de servicio (colas y demoras promedio) en el AICM, derivado de las labores de mantenimiento en sus pistas, cuando se realizan durante el intervalo entre las 06:00 y 24:00 horas	76
4.9 Comparativo del deterioro de servicio (colas y demoras máximas) en el AICM, derivado de las labores de mantenimiento en sus pistas, cuando se realizan durante el intervalo entre las 06:00 y 24:00 horas	77
4.10 Evolución del deterioro de servicio en el AICM durante el intervalo entre las 00:00 y 06:00 horas, para una capacidad en las pistas de 120 operaciones/hora	83
4.11 Evolución del deterioro de servicio en el AICM durante el intervalo entre las 06:00 y 24:00 horas, para una capacidad en las pistas de 120 operaciones/hora	84
4.12 Calidad de servicio en la plataforma Remota Oriente en la condición original, con seis posiciones de atraque; y cuando se incorporan seis posiciones adicionales. Para el intervalo entre las 00:00 y las 06:00 horas	88
4.13 Calidad de servicio en la plataforma Remota Oriente en la condición original, con seis posiciones de atraque; y cuando se incorporan seis posiciones adicionales. Para el intervalo entre las 06:00 y las 24:00 horas	89

CAPÍTULO 1:

I INTRODUCCIÓN

I.1 Antecedentes y justificación

En el ámbito mundial se ha incrementado rápidamente la demanda por el uso de los aeropuertos, mientras que la capacidad de los mismos se ha estancado. Como resultado, se ha presentado una aguda congestión en muchos de los principales aeropuertos del mundo. En el caso de Latinoamérica estos problemas se presentan en Brasil, Colombia y México¹. En Europa, cinco de sus aeropuertos principales funcionan en el límite de su capacidad, y de mantenerse esta tendencia, 19 de los principales estarán tan congestionados para 2030 que habrá retrasos en la mitad de sus vuelos².

El problema de la congestión es ya significativo, y se espera que empeore. La Federal Aviation Administration (FAA), de los Estados Unidos, predice incrementos importantes del tránsito aéreo en los próximos años, mientras que no se espera un aumento apreciable en la capacidad de los aeropuertos. El costo anual de la congestión aeroportuaria en los Estados Unidos es del orden de 31,200 millones de dólares (Barnhart et al, 2012³), por lo que la solución de este problema es innegablemente de gran importancia práctica.

¹ De acuerdo con las declaraciones de Alexandre de Gunten, Director de la Asociación Latinoamericana y del Caribe de Transporte Aéreo (<http://www.aerolatinnews.com>, del 21 de noviembre de 2011).

² Declaraciones de Siim Kallas, Vicepresidente de la Comisión Europea de Transportes (<http://www.aerolatinnews.com>, del 5 de diciembre de 2011).

³ P. 137.

En el caso de México la situación no es muy diferente, en el Programa Sectorial de Comunicaciones y Transportes 2007-2012, sólo se establece la construcción de tres nuevos aeropuertos (Objetivo 4.2.14). Sin embargo, en el AICM, a pesar de la construcción de la nueva Terminal 2, el problema de saturación en pistas se mantiene.

El sistema aeroportuario nacional está conformado por 85 aeropuertos (59 internacionales y 26 nacionales); además, existen 1,344 aeródromos. Del total de aeropuertos, 34 están concesionados al sector privado; 19 están a cargo de Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA) y cinco en sociedad con gobiernos estatales y el sector privado; el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM) opera independientemente; y los restantes 26 están a cargo de gobiernos estatales o municipales, o bien, son militares o privados (SCT, 2008⁵).

Dentro de la infraestructura aeroportuaria del país destaca el AICM⁶, dado que ocupa el primer lugar en la actividad aérea nacional, atiende al 46.9% de los pasajeros; el 48.9% de las operaciones (despegues y aterrizajes), y da servicio al 58% de la carga aérea, tanto de vuelos domésticos como internacionales⁷. Por ello, el desarrollo de un modelo de simulación de este aeropuerto resultaría ser una herramienta de gran valor para evaluar cuantitativamente cualquier cambio operativo, con objeto de mejorar su servicio y para efectos de planeación.

⁴ En la Riviera Maya, en Quintana Roo; en Mar de Cortés (Puerto Peñasco) en Sonora; y en Ensenada (Mesa del Tigre) en Baja California (SCT, 2008).

⁵ P.105.

⁶ El Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México es una de las principales infraestructuras en el ámbito mundial, dado que se ubicó en la posición número 52, en cuanto al movimiento de pasajeros; en el lugar 29, en relación con el número de operaciones efectuadas; y en el lugar 50, en cuanto al movimiento de carga aérea, durante el periodo diciembre/2010 – diciembre/2011. Ver Apéndice A.1.

⁷ Valores obtenidos mediante el procesamiento de las bases de datos de la Dirección General de Aeronáutica Civil, de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, para el año 2010 (<http://www.sct.gob.mx/transporte-y-medicina-preventiva/aeronautica-civil/estadistica/>).

El desarrollo y empleo de modelos computacionales para evaluar los niveles prevaecientes de servicio; las posibles opciones para reducir la congestión; y como una herramienta para mejorar la eficiencia de la operación y administración aeroportuaria han sido ampliamente reconocidos y documentados. Tales modelos pueden utilizarse en la simulación de, por ejemplo: movimientos de aeronaves en pistas, calles de rodaje y plataformas; asignación de salas de abordaje; flujos de pasajeros en el edificio terminal; y movimientos de vehículos en el sistema de transporte terrestre.

En el campo de la planeación existe una necesidad permanente en la predicción de los cambios en capacidad, cuando se modifica el arreglo de la terminal (layout) o el perfil de la demanda. Esto genera el requerimiento de un análisis detallado de los flujos, a través de los distintos subsistemas⁸ del aeropuerto. La complejidad que involucra realizar estas tareas necesita apoyo mediante modelos computacionales avanzados para obtener soluciones en tiempos cortos. Los subsistemas están formados por cada uno de los componentes principales del aeropuerto, por ejemplo, estacionamientos, accesos, salas de documentación, áreas de circulación de pasajeros (ambulatorios), bandas de reclamo de equipaje, servicio de inmigración, plataformas, calles de rodaje, pistas, y control de tránsito aéreo. Cada subsistema es un conjunto de elementos ordenados e interrelacionados que realiza una función determinada.

Un prerrequisito para el funcionamiento ordenado de un aeropuerto es que todos sus subsistemas estén interconectados en forma armónica. La falla o desorganización del servicio en cualquiera de los subsistemas, afecta la operación

⁸ El concepto de “subsistemas de un aeropuerto” ha sido utilizado previamente por varios autores, por ejemplo, Hamzawi, 1992; y Nombela, 2009. Debido a que un aeropuerto es un sistema complejo, al trabajar con los subsistemas se tiene la ventaja de que se pueden estudiar por separado sus distintos componentes.

de todos sus eslabones; afortunadamente los efectos en el sistema pueden examinarse a través de los modelos de simulación (Herrera, 2006⁹).

Por otro lado, se puede observar en la literatura, que hay relativamente pocos estudios relacionados con simulación y aeropuertos, en comparación con simulación en otros modos de transporte; o de planeación y operación aeroportuaria (en forma conjunta) en comparación con planeación aeroportuaria u operación aeroportuaria.

Los resultados de una búsqueda en la base de datos más grande del mundo de investigación en el transporte, el Transport Research International Documentation (TRID) Online¹⁰, en la que se incluyeron los términos señalados muestran que, por ejemplo, durante el periodo 2000-2010 se elaboraron más de catorce mil seiscientos documentos relacionados con simulación en el transporte, sin embargo, sólo 309 correspondieron a simulación en aeropuertos, esto representa tan sólo el 2.1% del total de los trabajos elaborados. La escasez de trabajos en simulación aeroportuaria, comparada con la de simulación en otros modos de transporte salta a la vista (Cuadro 1.1).

Puesto que este trabajo se centra en el desarrollo de un modelo de simulación, en el inciso siguiente se mencionan brevemente los distintos tipos de modelos que existen, sus ventajas y clasificación, y además, algunas de las características de los programas de simulación desarrollados recientemente y sus aplicaciones. Sin embargo, conviene señalar antes que existe una relación estrecha entre el diseño y la operación de un aeropuerto, dado que ambos interactúan entre sí. Un diseño pobre afecta la operación del aeropuerto y genera un incremento en sus costos.

⁹ Pp. 48-49.

¹⁰ Base de datos del Transportation Research Board (TRB) norteamericano; y del International Transport Research Documentation (ITRD) (<http://trb.org/>).

Cuadro1.1 Escasez de estudios de simulación aeroportuaria, y de planeación y operación aeroportuaria.

Año	Término y número de documentos				
	<i>Simulation</i>	<i>Airport & simulation</i>	<i>Airport & planning</i>	<i>Airport & operation</i>	<i>Airport & planning & operation</i>
2010	1,528	19	214	32	16
2009	1,431	33	299	49	19
2008	1,513	17	211	57	25
2007	1,503	31	228	42	21
2006	1,411	26	178	38	11
2005	1,254	15	185	45	17
2004	1,248	27	144	33	10
2003	1,117	35	171	45	18
2002	1,145	45	145	42	15
2001	1,232	37	160	38	10
2000	1,272	24	116	21	8
Totales	14,654	309	2,051	442	170
Promedio anual	1,332	28	186	40	15

Fuente: Elaboración propia con base en <http://trid.trb.org/results.aspx#>

Por otro lado, es difícil diseñar la infraestructura aeroportuaria sin un conocimiento sólido de su operación. Debido a que la seguridad es el requerimiento prevaleciente en la aviación, y la estandarización es uno de los medios para alcanzarla, la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) estableció en su convención de mayo de 1951, en el Anexo 14 (Aeródromos), la información necesaria para la planeación, diseño y operación de los aeródromos que dan servicio al transporte aéreo internacional. Las estipulaciones en este anexo tienen diferentes niveles de obligatoriedad y relevancia, por lo que se subdividen en tres tipos: estándares, recomendaciones y notas. Las primeras, son especificaciones de algunas características físicas, configuraciones, materiales, rendimientos y procedimientos; su aceptación es incondicional para garantizar la seguridad y regularidad internacional de la navegación aérea. Por su parte, las recomendaciones son especificaciones deseables, que no tiene carácter obligatorio, y por último, las notas, son sólo de carácter informativo y explican con mayor detalle los estándares y las recomendaciones (Kazda y Caves, 2000).

I.2 Los modelos de simulación

La simulación es la representación de la operación de algún proceso o sistema del mundo real a través del tiempo. Ya sea hecha manualmente o en una computadora, la simulación involucra la generación de una historia artificial de un sistema y su observación para obtener inferencias relacionadas con las características operativas del sistema real (Banks et al, 1996).

La técnica de simulación de sistemas es una herramienta de análisis, cuyo uso se ha extendido a diversas áreas. Su inicio se ubica en la década de los cuarentas cuando Von Neumann y Ulam la utilizaron para analizar y resolver problemas complejos en el campo de la física, en los que la solución analítica no siempre era factible o era demasiado costosa. El uso de la computadora, con las facilidades y ventajas que implica, hizo posible que la simulación de sistemas ampliara las áreas y objetivos de su aplicación (Rodríguez y Delgado, 1991).

Los modelos de simulación toman comúnmente la forma de un conjunto de supuestos respecto a la operación de un sistema. Estos son expresados en forma de relaciones matemáticas y lógicas entre sus componentes. Después de que han sido desarrollados y validados, pueden utilizarse para investigar una amplia variedad de preguntas acerca del mundo real.

La simulación también puede ser utilizada para estudiar sistemas en su etapa de diseño, antes de que dichos sistemas sean construidos. De esta manera los modelos de simulación son utilizados tanto como una herramienta de análisis, para predecir los efectos de cambios en sistemas existentes, o como una herramienta de diseño para predecir el comportamiento de sistemas nuevos.

La Figura 1.1 muestra las distintas alternativas que pueden seguirse para realizar experimentos con un sistema, desde luego, el mayor realismo es alcanzado al experimentar con el sistema existente (real), lo cual constituye la principal ventaja de esta alternativa. Sin embargo, esto tiene numerosas

desventajas, entre las cuales está el hecho de que el sistema debe existir antes de que los experimentos puedan realizarse, mientras que el objetivo podría ser el diseño de un sistema que aún no existe.

Por otro lado, si el sistema ya existe y está en operación, debido a razones económicas y/o políticas podría no ser factible interrumpir su utilización con objeto de realizar la experimentación, como es el caso de un aeropuerto en operación.

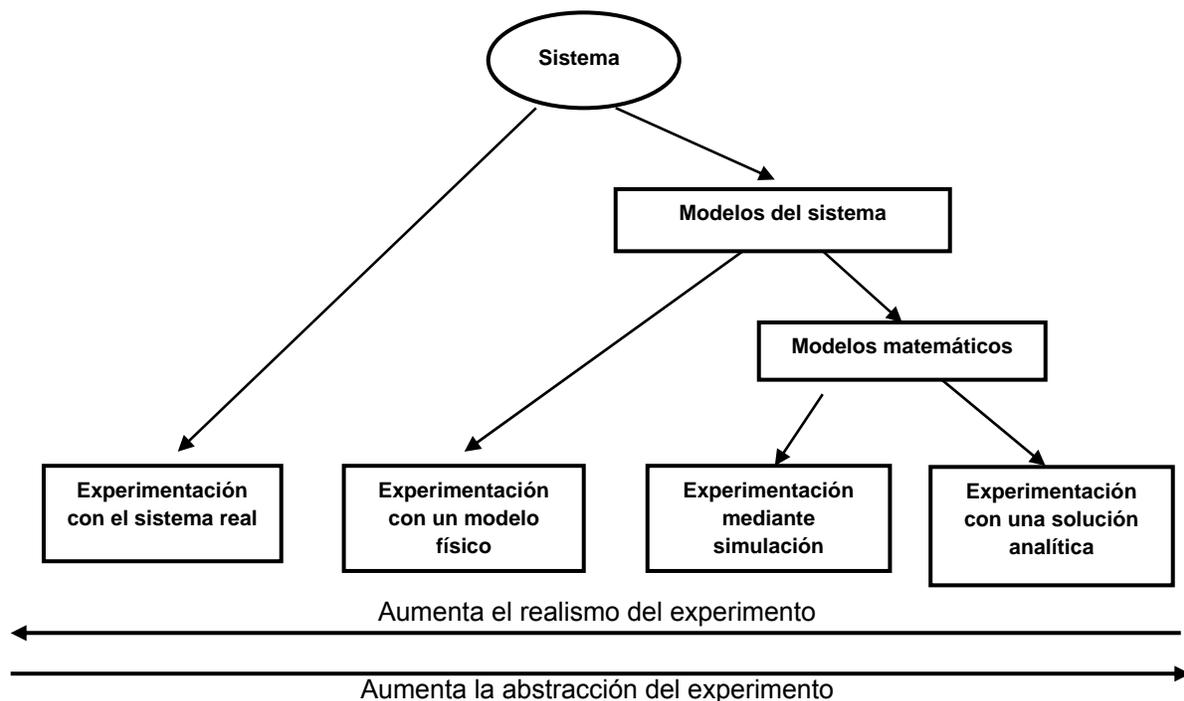


Figura 1.1 Caminos para la experimentación con un sistema

Fuente: Elaboración propia con base en Law y Kelton, 2006.

Aún en el caso de que el sistema real pudiera ser utilizado para la experimentación, generalmente se requiere mucho tiempo para realizar las pruebas requeridas. Además, los resultados observados durante la experimentación con el sistema real no se pueden generalizar. Los resultados aplicarían sólo al sistema, en las condiciones bajo las cuales la experimentación fue realizada. No obstante, algunos sistemas son inherentemente complejos, por lo que debe recurrirse a la experimentación directa con el sistema real, al menos eventualmente.

Observe en la Figura 1.1 cómo la experimentación con el modelo de una solución analítica involucra el mayor grado de abstracción. Dicho modelo es el resultado de la abstracción de las propiedades de un sistema, mediante ecuaciones que expresan cuantitativa y lógicamente las relaciones entre los elementos que lo forman.

Las soluciones analíticas mediante herramientas matemáticas (álgebra, cálculo diferencial e integral, y/o teoría de probabilidades), obtienen soluciones exactas a los problemas de interés; sin embargo, la mayoría de los sistemas reales son muy complejos para permitir evaluaciones analíticas, por lo que estos sistemas pueden ser estudiados mediante la simulación.

La experimentación mediante modelos de simulación ofrece las siguientes ventajas:

- a) No es necesaria la interrupción de la operación del sistema real. De esta forma pueden ser exploradas nuevas políticas, reglas de decisión, procedimientos organizacionales y operacionales, sin alterar el curso del sistema que se desea evaluar.
- b) Realismo. Los modelos de simulación son realistas en el sentido de que reproducen las características del sistema que está siendo modelado.
- c) Aplicación para sistemas no existentes. Los sistemas para los que va a ser investigado su comportamiento no tienen que existir previamente.
- d) Acortamiento o alargamiento de la representación del tiempo real. La operación equivalente del sistema real de días, semanas o meses puede ser simulada en una computadora en tan solo segundos, minutos u horas¹¹. Por otro lado, si se requiere, la representación del tiempo real puede ser alargada para observar con más detalle el fenómeno bajo investigación.

¹¹ Para un mismo intervalo, mediante la simulación se puede realizar un mayor número de experimentos en comparación con la experimentación del sistema real, por lo que aumenta el número de alternativas que pueden ser investigadas.

- e) Menores costos. Algunos autores han estimado que los estudios diseñados para estimar las características de un sistema propuesto, mediante la simulación, pueden tener un costo de un dos por ciento o menos del capital requerido para la construcción de un sistema real¹² (Henrisken, 1983).
- f) Se obtienen respuestas a preguntas del tipo “¿qué pasa si...?” Esto es particularmente útil para el diseño de sistemas nuevos.

Los modelos computacionales de las operaciones aeroportuarias, se han convertido en herramientas indispensables para los diseñadores de aeropuertos. Las capacidades de estos modelos han mejorado enormemente en años recientes. Estos modelos se pueden clasificar de acuerdo con el nivel de detalle que manejan, la metodología que utilizan o su cobertura.

Los modelos que utilizan un nivel de detalle reducido se conocen como macroscópicos, por el contrario, los que manejan un alto nivel de detalle se conocen como microscópicos. El objetivo de los modelos macroscópicos es ofrecer respuestas aproximadas a algunos problemas en la planeación y en el diseño, enfatizando la evaluación del rendimiento de un amplio rango de alternativas. Para este propósito, los modelos macroscópicos omiten muchos detalles. En estos modelos, lo que interesa es predecir en forma agregada los flujos de las entidades (pasajeros o aeronaves) durante un intervalo, sin detallar con precisión los trayectos de los flujos o sin determinar que pasa en forma individual con cualquier entidad. Los modelos macroscópicos son útiles principalmente en el análisis de políticas, estrategias de desarrollo, evaluaciones costo-beneficio y análisis de flujos de tránsito. Idealmente, requieren para su ejecución un tiempo corto, por lo que se puede explorar un gran número de escenarios alternativos.

¹² De esta forma, pueden ser probados nuevos diseños de equipos de distribución física de instalaciones o de sistemas de transporte, entre otros, sin la necesidad de utilizar recursos para su construcción o adquisición.

Los modelos microscópicos están diseñados para tratar con problemas tácticos y representan con gran fidelidad los diversos procesos que se realizan en un aeropuerto. Comúnmente, estos modelos representan aeronaves, pasajeros o equipaje de forma individualizada. El modelo mueve a estas entidades a través de los subsistemas bajo estudio, tomando en cuenta las características y atributos de cada aeronave, pasajero o equipaje. Los detalles operacionales tales como movimientos en calles de rodaje, asignación de posición de embarque, maniobras, disciplina de la línea de espera, etcétera, son incluidos generalmente en estos modelos.

Es importante establecer una distinción entre los modelos que utilizan una solución analítica y los de simulación. Los primeros son abstracciones, necesariamente representaciones matemáticas simplificadas de las operaciones aeroportuarias, que consisten típicamente de un conjunto simple o complejo de ecuaciones. Al resolver tales conjuntos de ecuaciones, los modelos analíticos estiman los valores de interés, que son comúnmente capacidades o demoras. En contraste, los modelos de simulación crean objetos que se mueven a través de los distintos componentes del aeropuerto que describe el modelo. Al registrar los flujos de los objetos en tales componentes y la cantidad de tiempo requerida para moverse entre tales puntos, los modelos de simulación estiman, por ejemplo, los rendimientos o niveles de servicio. Existe una fuerte correlación entre la metodología utilizada en el modelo y el nivel de detalle. En particular, los modelos analíticos tienden a ser en mayor medida macroscópicos. En contraste, prácticamente todos los modelos microscópicos son simulaciones.

En una clasificación posterior, tanto los modelos analíticos como las simulaciones, se subdividen metodológicamente en: 1) Modelos dinámicos o estáticos y 2) Estocásticos o determinísticos. Los modelos dinámicos manejan parámetros de entrada que dependen del tiempo y consideran las fluctuaciones del tránsito y del nivel de servicio a través del tiempo; los modelos estáticos suponen que los parámetros del modelo permanecen constantes durante el

transcurso del tiempo. Los modelos estocásticos trabajan con parámetros de entrada que son cantidades probabilísticas (por ejemplo, variables aleatorias) y consideran los impactos de la incertidumbre en las medidas de rendimiento seleccionadas. Los modelos de simulación estocásticos son a menudo referidos como simulaciones de Monte Carlo. Por último, en el caso de los modelos determinísticos, los parámetros de entrada son cantidades fijas.

Los modelos pueden estar limitados en cuanto a su alcance, así la cobertura depende de cuántos y cuáles elementos son utilizados en el modelo desarrollado. Por ejemplo, un modelo sólo puede abarcar las operaciones de las plataformas, mientras que otro puede representar las operaciones en pistas, calles de rodaje y plataformas (de Neufville y Odoni, 2003, pp. 747-750).

El modelo de simulación que se propone, de acuerdo con su nivel de detalle es microscópico, y con respecto a su metodología dinámico y estocástico, con cobertura en pistas, calles de rodaje y posiciones de atraque del AICM.

En un sondeo de programas de simulación (simulation software survey) aplicados al transporte y otras áreas, realizado por Swain (2011), se señala que estas herramientas computacionales son impresionantes en cuanto a su sofisticación, capacidad y aplicaciones. Los programas incluidos en este estudio presentan en conjunto un soporte sin paralelo para la construcción, visualización y análisis mediante modelos de simulación, con un amplio rango de aplicaciones. Muchos tienen la capacidad para interactuar con otros programas, o pueden aprovechar las ventajas de rutinas de optimización para ajustar los recursos simulados, reduciendo costos, riesgos o demoras. Representan la culminación de más de medio siglo de convergencia en esfuerzos de investigación, para el desarrollo de programas y equipos de simulación. En dicho estudio se hizo hincapié en aquellos programas que se ejecutan en computadoras personales para realizar las simulaciones, dado que estos son los más adecuados en ciencia administrativa (management science) e investigación de operaciones. Omite

aquellos programas cuya capacidad principal es la simulación continua (que utiliza ecuaciones diferenciales en sistemas físicos) o el entrenamiento (por ejemplo, simuladores de vuelo).

El sondeo incluyó 55 productos, cuyo rango y variedad continua creciendo, lo cual refleja su solidez y la sofisticación de los usuarios. El propósito de la información citada en el estudio es ofrecer un indicador general de la capacidad de los productos, de sus características especiales y de su utilización.

En general se observó que estos programas han sido utilizados frecuentemente en estudios de simulación relacionados con logística, cadenas de suministro y transporte. La simulación también ha sido utilizada para estudiar todos los aspectos del transporte de carga dentro de las cadenas de suministro. Algunos estudios se han enfocado en las operaciones de grandes redes, mientras que otros han examinado la ruta óptima de vehículos que operan en muelles o en centros de distribución regional. Mediante modelos de simulación ha sido estudiado el efecto potencial de la aplicación de nuevas tecnologías, como es el caso de la identificación por radiofrecuencia (RFID), en las cadenas de suministro. Además, la simulación puede ser utilizada para examinar los sistemas de información que apoyan a las cadenas de suministro, o para determinar sus riesgos y diseñar estrategias que los disminuyan.

Los modelos de simulación han sido utilizados por décadas para estudiar, mejorar y optimizar procesos de manufactura y de operación, lo cual se manifiesta en muchos de los productos de este sondeo. Esta aplicación continúa siendo muy importante para estos modelos, que ahora incluyen tanto las iniciativas de eficiencia productiva (lean manufacturing) y los estudios de seis sigma.

La milicia ha utilizado los modelos de simulación por décadas en las áreas de operaciones y entrenamiento. Sus aplicaciones se han incrementado en áreas no militares, para examinar aspectos de seguridad en gran variedad de lugares,

por ejemplo, aeropuertos, plantas de generación de energía, y centros de reunión públicos. Las aplicaciones de análisis mediante modelos de simulación se han extendido a la planeación de condiciones de emergencia de diversa índole, por ejemplo, para evaluar planes de desalojo, o de respuesta ante emergencias. La entrega de alimentos básicos o de artículos en centros de acopio, para la protección de afectados por desastres naturales, son otros estudios que han sido desarrollados mediante modelos de simulación.

Finalmente, la atención médica ha sido un área de gran número de estudios de simulación, en todos los niveles. Se han utilizado para examinar políticas públicas, por ejemplo, en la distribución nacional de órganos para trasplante, o en políticas locales para mejorar el cuidado de los pacientes. También, se han aplicado para determinar la asignación de personal y su programación en salas de urgencia, quirófanos, y laboratorios clínicos; y en la logística de suministros médicos.

De los 55 productos registrados en el sondeo, 34 tienen una aplicación primaria en transporte. En particular el programa Flexsim, que es el utilizado en esta tesis, puede utilizar otros programas para realizar funciones especializadas; puede ser ajustado por el cliente de acuerdo con sus necesidades. En su construcción se tiene acceso a módulos de programación. Para la información de entrada incluye sin costo adicional al programa Experfit¹³; como soporte para el análisis de los resultados incluye gráficos de diversos tipos, incluso en tercera dimensión. Posee un módulo para realizar experimentos; presenta visualización animada en tercera dimensión, la cual se puede exportar a otros programas; permite importar dibujos elaborados mediante diseño asistido por computadora (computer-aided design, CAD), tiene soporte directo mediante línea telefónica o *en línea*, tiene un foro de discusión en Internet, y ofrece cursos de entrenamiento en

¹³ El principal objetivo de este programa es determinar con facilidad y precisión la función de densidad de probabilidad que mejor representa a un conjunto de datos (Averill, 2011).

sus oficinas o en las del cliente. Dentro de todos los programas del sondeo señalado, sólo otros cuatro¹⁴ cumplen con todas las características técnicas deseables que tiene Flexsim. Sin embargo, otro factor relevante y determinante para la elección de este programa fue su costo total, que incluyó entrenamiento, soporte, mantenimiento (actualización de versiones) y la capacidad para ser utilizado hasta por treinta usuarios en forma simultánea.

I.3 Planteamiento del problema

Antes de centrar la atención en la problemática del objeto de estudio, el AICM, conviene remarcar respecto a lo señalado en los incisos anteriores, que hay relativamente pocos trabajos de simulación enfocados a la planeación y operación aeroportuaria, a pesar de que esta técnica ofrece diversas ventajas, y que, en la mayoría de los escasos trabajos desarrollados, dichos modelos sólo abordan algún elemento del aeropuerto. Por el contrario, el modelo propuesto busca cubrir esta deficiencia, al considerar en forma integral a los principales elementos con los que interactúan las aeronaves en su operación dentro del aeropuerto (pistas, calles de rodaje y plataformas).

El principal reto del sistema aeroportuario nacional continúa siendo la enorme demanda de servicios a atender en el centro del país, particularmente en el AICM (SCT, 2008¹⁵), lo que ha tenido como respuesta la ampliación y remodelación de la Terminal 1 (T1) a su máxima capacidad y la construcción de la nueva Terminal 2 de pasajeros (T2). En el interior de la T1 más de 90,000 m² fueron ampliados y remodelados, y en las aéreas operacionales se sumaron 129,000 m² en la construcción de tres calles de rodaje y dos plataformas nuevas. Para disponer de los terrenos necesarios se demolieron y reubicaron 58 hangares. La T2 cuenta con un total de superficie construida en su edificio de pasajeros de

¹⁴ Todos comercializados por la empresa INCONTROL Simulation Solutions.

¹⁵ P. 109.

229,000 m², que incluye salas de última espera, patio-hotel y estacionamiento cubierto, y 140,000 m² de superficie exterior entre jardineras, plazas comerciales y vialidades internas. La plataforma de aviación comercial tiene una superficie total de de 294,000 m², y está conformada por 96,000 m² de concreto hidráulico en la zona de estacionamiento de aeronaves (23 posiciones fijas y siete remotas), y 198,000 m² de concreto asfáltico en las zonas de rodamiento. Asimismo se construyeron 194,000 m² de nuevas calles de rodaje para agilizar el movimiento de aeronaves en la zona operacional (ASA, 2006).

Sin embargo, debido a la falta de espacio no fue posible aumentar la capacidad de las pistas del AICM, las cuales constituyen el elemento crítico¹⁶ que limita su capacidad total. Las pistas de este aeropuerto tienen una separación de 310 metros, dicha condición no permite las operaciones simultáneas, sólo secuenciales, por lo que la capacidad de las pistas está limitada a 61 operaciones/hora.

Por ello, se requiere atender la insuficiencia de servicios aeroportuarios en el Valle de México instrumentando una solución a largo plazo (SCT, 2008¹⁷), lo cual se traducirá en la construcción de un nuevo aeropuerto. Sin embargo, debido a que todavía no se ha definido incluso la ubicación de dicha infraestructura, el actual aeropuerto deberá operar aún durante varios años. Se ha estimado que dicho proyecto requerirá de cuando menos cinco años para su desarrollo (Herrera, 2001).

Lo anterior implica que la principal infraestructura aeroportuaria de nuestro país (el AICM), deberá cubrir la demanda actual y su crecimiento durante

¹⁶ Por esta razón el modelo se centra en las pistas del aeropuerto, aunque también incluye sus calles de rodaje y plataformas.

¹⁷ P. 109.

algunos años más, operando muy cerca de su capacidad máxima, generando esta condición diversas dificultades y grandes retos.

El modelo propuesto servirá como una herramienta de análisis para cuantificar las diversas alternativas de mejora operativa del AICM con objeto de vencer dichos retos, y para apoyar el cumplimiento del objetivo 4.2.1. del Programa Sectorial de Comunicaciones y Transportes para el Sistema Aeroportuario Nacional: "...mejorar la calidad de la infraestructura y los servicios de transporte aéreo..." (SCT, 2008¹⁸).

También evaluará los beneficios derivados de establecer una nueva política de atención de aeronaves, en particular, con objeto de minimizar los costos de operación de las mismas y las demoras de los pasajeros durante las fases de despegue y aterrizaje.

Además, servirá como una herramienta de planeación, al determinar en qué momento se presenta un valor de saturación crítico en el aeropuerto y al evaluar afectaciones operativas, como por ejemplo, condiciones adversas inevitables (neblina y/o lluvia) o necesarias (mantenimiento de pistas, calles de rodaje y/o plataformas), con objeto de tomar medidas preventivas para atenuar o aminorar sus consecuencias.

La experiencia operacional con los sistemas de transporte ha mostrado que las demoras empiezan a ser significativas cuando la demanda alcanza alrededor del 80% de la capacidad disponible del sistema, y que su valor promedio se incrementa exponencialmente conforme la relación demanda/capacidad se aproxima al 100% (Odoni y Vittek, 1976; y Hamzawi, 1992).

¹⁸ P. 110.

Experimentos con modelos de simulación aplicados a aeropuertos (Herrera, 2006) muestran que al igual que las demoras, los tamaños de las colas de aeronaves a la entrada de las pistas (tanto en despegues como en aterrizajes), empiezan a crecer sustancialmente a partir de valores de utilización promedio de las pistas mayores a 0.8 (Figura 1.2).

Observe en la Figura 1.2 cómo, por ejemplo, cuando la relación demanda/oferta crece de 0.5 a 0.6, el tamaño promedio de la cola en las pistas es de apenas una aeronave; sin embargo, si dicha relación crece de 0.9 a 0.99, el tamaño de la cola respectiva crecerá en promedio 21 aeronaves (pasando de 4 aeronaves inicialmente, a 25 al final).



Figura 1.2 Tamaño promedio de las líneas de espera en las pistas de un aeropuerto en función de su utilización promedio

Fuente: Herrera, 2006.

1.4 Hipótesis y objetivos

A continuación se establece la hipótesis de trabajo, el objetivo general y los objetivos específicos de la tesis.

I.4.1 Hipótesis general

Es posible modelar y simular las operaciones aeroportuarias para mejorar la toma de decisiones y reducir los costos de operación de las aeronaves durante las fases de despegue y aterrizaje en el AICM.

I.4.2 Objetivo general

Generar un modelo de simulación que considere las principales variables operativas en pistas, calles de rodaje y plataformas del AICM, para evaluar cuantitativamente propuestas que den soporte a la toma de decisiones relacionadas con su planeación y operación.

I.4.3 Objetivos específicos

1. Construir y validar un modelo de simulación operativo del AICM.
2. Establecer los escenarios y alcances de propuestas de planeación a estudiar con el modelo.
3. Establecer los escenarios y alcances de los cambios operativos a estudiar con el modelo.
4. Realizar las simulaciones con cada uno de los escenarios establecidos, utilizando el modelo construido, para medir los impactos originados.

CAPÍTULO 2:

II REVISIÓN DE LITERATURA

En esta sección se presenta una revisión integrada y resumida de la literatura relacionada con el proyecto de tesis. Mediante una revisión de los trabajos desarrollados en los últimos años (entre 2000 y 2010) se encontró que se han publicado 309 documentos relacionados con modelos de simulación aplicados a aeropuertos (airport simulation) (Cuadro 2.1). En particular los temas relacionados con el modelo de simulación propuesto son planeación y operación aeroportuaria (airport planning and operation), control de tránsito aéreo (air traffic control, ATC) y manejo de aeronaves de gran capacidad (large aircraft).

Cuadro 2.1 Clasificación de temas para el tópico de simulación en aeropuertos.

Tema	Número de documentos
1. Planeación y operación aeroportuaria	20
2. Control de tránsito aéreo	14
3. Aeronaves de gran capacidad	9
4. Varios	266
Total	309

Fuente: Elaboración propia con base en <http://trid.trb.org/search.aspx>

II.1 Planeación y operación aeroportuaria

En cuanto a planeación y operación aeroportuaria, que es el tema con más artículos publicados, catorce de las veinte investigaciones recientes se han centrado en aspectos que no se relacionan con la infraestructura que considera el modelo de simulación desarrollado (pistas, calles de rodaje y plataformas), por lo que no abordan los temas de esta tesis. Consideran, por ejemplo, mejoras en la accesibilidad de vehículos terrestres a los aeropuertos en horas pico (un artículo),

soluciones a problemas con vehículos terrestres en los estacionamientos de los aeropuertos (dos artículos), simulaciones de las terminales de pasajeros para mejorar su desempeño (cinco artículos), modelos para la planeación de la implementación de equipos que movilizan a los pasajeros dentro del aeropuerto (cinco artículos), y análisis cuantitativo de la seguridad operativa de los pasajeros en los puntos de revisión mediante modelos de simulación (un artículo).

Por otro lado, se detectaron seis artículos de modelos de simulación que sí abordan la infraestructura que se considera en este tema de tesis. Así, por ejemplo, Lee (2002), estableció un modelo de simulación que permite obtener información estadística de los movimientos en calles de rodaje de un aeropuerto. El autor señaló que la ventaja de utilizar un modelo de simulación, en este caso, se debía a que no se disponía de la gran cantidad de datos requeridos, ni con el nivel de detalle solicitado.

Santana y Muller (2003) desarrollaron un modelo de simulación para el Aeropuerto Internacional de Sao Paulo (Guarulhos) en Brasil, con objeto de analizar las demoras en dicha infraestructura. Mediante simulaciones fueron analizados diferentes escenarios operacionales y características físicas del aeropuerto. Los resultados obtenidos, mostraron soluciones para resolver el problema de las demoras en ese aeropuerto. También, se presentaron alternativas para la operación aeroportuaria y cambios en su infraestructura aeroportuaria.

El efecto de la incertidumbre operacional en la programación de los vuelos por parte de las aerolíneas y el problema del control de su puntualidad han sido estudiados por Wu (2003 y 2004), mediante modelos de simulación. La operación de un ciclo completo de servicio de las aeronaves ha sido el punto focal a estudiar cuando las aerolíneas tratan de controlar las demoras.

La creciente complejidad en el diseño de los programas de vuelos y la continua presión para una mayor utilización de las aeronaves, también ocasionan que el cumplimiento de la puntualidad sea una tarea cada vez más difícil. Los

hallazgos de los análisis empíricos realizados indicaron que las aerolíneas confrontan diferentes problemas de incertidumbre, dependiendo de cada aeropuerto. Algunas incertidumbres provienen de las estrategias de planeación de los programas de vuelos, como por ejemplo, tiempos de ciclos de operación reducidos y otras de las demoras operacionales en los aeropuertos, tales como problemas de procesamiento de los pasajeros.

Con base en el análisis de la curva de puntualidad, el autor encontró que la puntualidad de cada vuelo es una variable dependiente de la hora del día, de la eficiencia operacional de los trabajadores en tierra y, más significativamente, de la naturaleza del diseño del programa de vuelos. Los modelos de simulación fueron utilizados para establecer los escenarios de análisis de los programas de vuelos.

Wu y Caves (2004) desarrollaron un modelo de simulación de tipo markoviano para investigar el rendimiento en la operación del ciclo de trabajo de las aeronaves. Mediante este modelo se puede simular el comportamiento de transición estocástico entre las actividades relacionadas con el ciclo de operación de las aeronaves y las potenciales actividades de desorganización originadas por los pasajeros y los servicios en tierra de las aeronaves. Adicionalmente, las propiedades de las cadenas de Markov fueron utilizadas para modelar los efectos de interdependencia entre las secuencias de los procedimientos de los ciclos de servicio de las aeronaves. El modelo desarrollado puede aplicarse para simular la puntualidad del programa de vuelos bajo diferentes condiciones operacionales en distintos aeropuertos.

Herabat y McNeil (2004) exploraron el impacto de la implementación de la separación vertical mínima reducida (reduced vertical separation minimum, RVSM) en las aeronaves que operan en un aeropuerto grande. Su hipótesis de trabajo fue que las frecuencias de operación de las aeronaves, tanto en despegues como aterrizajes, se incrementarían en casi el doble para un mismo espacio aéreo, cuando todos los vuelos se realizaran bajo las condiciones de RVSM. Para probar esta hipótesis fueron desarrollados y utilizados modelos de simulación. En el

estudio fueron consideradas tres configuraciones de pistas: paralelas con operaciones secuenciales, paralelas con operaciones simultáneas y pistas que se intersectan. Los análisis se realizaron para un día completo de operaciones durante los meses pico y considerando dos condiciones meteorológicas, buenas y adversas.

Como referencia, cabe señalar que a finales de los años cincuenta del siglo pasado, se reconoció que era necesario aumentar, por encima de determinado nivel de vuelo, la separación vertical mínima (vertical separation minimum, VSM) prescrita de 300 m (1000 pies) debido a que, a medida que aumenta la altitud disminuye la precisión de los altímetros barométricos. Esto dio origen a que en 1960 se estableciera un VSM de 600 m entre aeronaves por encima del nivel de vuelo (flight level, FL) FL290. En 1982 con la coordinación de un grupo de expertos de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), los Estados miembros iniciaron programas a fin de estudiar a fondo la cuestión de la reducción de la VSM por encima del FL290. Más adelante, en 1988 se respaldó la propuesta para implantar el espacio aéreo RVSM, a fin de aliviar algunos de los problemas que han experimentado los transportistas aéreos. Se estableció que su implantación iniciara en la región del Atlántico Norte, por fases, aplicándose la primera a partir de 1997, entre el FL330 a FL370; la segunda fase a partir de 1998, del FL310 a FL390, y finalmente se extendió en 2002, desde el FL290 hasta FL410. Posteriormente, se han incorporado otros espacios aéreos a las operaciones RVSM como son, Pacífico Norte, Atlántico del Oeste, Europa, Pacífico Oriental/China, Mar del Sur, dentro de un plan de cobertura mundial que forma parte de los nuevos sistemas de Comunicación, Navegación y Vigilancia / Gestión de Tránsito Aéreo recomendados por la OACI. En Norteamérica, Canadá implantó en 2002 el espacio RVSM en la Región Norte de su espacio aéreo, asimismo Estados Unidos tiene, a partir de 2005 implantado el RVSM en todo su espacio aéreo. La operación RVSM, en el espacio aéreo mexicano, se realizará bajo procedimientos homologados, con los espacios aéreos de los Estados adyacentes. La Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC) y el Órgano

Desconcentrado, Servicios a la Navegación en el Espacio Aéreo Mexicano (SENEAM), formaron el Grupo de Trabajo RVSM integrado por representantes del sector aeronáutico, cuya función es llevar a cabo el proceso para el establecimiento de las operaciones RVSM en el espacio aéreo mexicano, el cual incluye el desarrollo de la normatividad correspondiente, entre otras acciones (DGAC, 2007).

II.2 Control de tránsito aéreo

En cuanto a modelos de simulación que abordan el aspecto de control de tránsito aéreo (CTA), de los catorce artículos identificados, la mayoría no se relacionan con el tema de esta tesis. Por ejemplo, siete se enfocan a la seguridad operacional, para simular la carga de trabajo de los controladores de tránsito aéreo, con objeto de determinar cómo afecta a su desempeño o cuál es el efecto de la monotonía en su trabajo, entre otros. Cuatro artículos se relacionan con la aplicación de modelos de simulación para el entrenamiento de los controladores. Un artículo tiene que ver con la aplicación de modelos de simulación para detectar potenciales daños en el pavimento de los aeropuertos y, otro más, con el diseño del interior de la torre de control. Sólo un artículo se relaciona con el tema de tesis.

En efecto, Trani y Baik (2002) diseñaron un modelo de simulación patrocinado por la Federal Aviation Administration (FAA) que sirvió como una herramienta de investigación para comprender conceptos de automatización avanzada en la operación en tierra de las aeronaves, por ejemplo, la asignación inteligente de rutas, el enlace con bases de datos y problemas con la carga de trabajo de los controladores del tránsito aéreo. El modelo se diseñó para que tuviera la capacidad de reproducir el comportamiento dinámico de las aeronaves y también incorporó las actividades de comunicación entre los controladores y los pilotos. Estas actividades son críticas en la operación del CTA y, en algunos casos, limitan la capacidad de las instalaciones.

Es importante remarcar que todas las investigaciones señaladas antes, relacionadas con el control de tránsito aéreo, consideran la atención de aeronaves de acuerdo con el orden en que se solicita el servicio, siguiendo el principio de primeras entradas, primeras salidas (FCFS, por sus siglas en inglés, first-come-first-served). El modelo propuesto a diferencia de este principio, utilizado actualmente en todos los aeropuertos del mundo, evalúa una nueva política para administrar las operaciones de despegue y aterrizaje, con objeto de minimizar los costos de operación de las aeronaves y las demoras de los pasajeros, como una de sus múltiples aplicaciones. 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 OACI, en sus diversos documentos derivados del Convenio de Aviación Civil Internacional. En cuanto a la asignación de salidas y llegadas de aeronaves al aeropuerto, el servicio de control de aeródromo lo ordenará y autorizará 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, 2011¹⁹).

II.3 Aeronaves de gran capacidad

En relación con modelos de simulación aplicados a aeronaves de gran capacidad se identificaron nueve documentos, de los cuales cuatro abordan el tema de los flujos de pasajeros en las terminales, dos se relacionan con la seguridad del equipaje y de las aeronaves, otros dos abordan el tema de los pavimentos del aeropuerto, por ejemplo, los problemas potenciales en el pavimento originados por el Airbus A-380 y, por último, un modelo de simulación se aplicó para estimar la comodidad durante los despegues y aterrizajes de una

¹⁹ ENR 1.1-19, 10.6 y 10.7; ENR 1.1-23, 19.1; ENR 1.4-1, 2.1; y AIC 22198303.

aeronave de gran capacidad, en función de la rugosidad de la pista del aeropuerto. Ninguno aborda los aspectos que se manejan en este tema de tesis.

II.4 Resumen de la revisión bibliográfica

En el Cuadro 2.2 se presenta un resumen de los principales hallazgos encontrados en la revisión bibliográfica. En el último renglón del cuadro se hace una comparación con las aportaciones de este tema de tesis.

Cuadro 2.2 Resumen de la revisión bibliográfica de modelos de simulación aplicados a aeropuertos.

Autores	Temas		
	Planeación y operación	CTA	Aeronaves de gran capacidad
Lee, 2002.	Calles de rodaje.		
Trani y Baik, 2002.	Investigación de la automatización avanzada en la operación en tierra de las aeronaves.		
Santana y Muller, 2003.	Demoras en infraestructura.		
Wu, 2003 y 2004.	Programación de los vuelos y puntualidad.		
Herabat y McNeil, 2004.	Impacto de la implementación de la separación vertical mínima reducida (RVSM).		
Wu y Caves, 2004.	Rendimiento del ciclo de trabajo de las aeronaves.		
Varios.			Terminales de pasajeros; seguridad; pavimentos; y comodidad pasajeros. La mayoría enfocados al Airbus A-380, se han elaborado como modelos aislados.
Herrera, 2012.	Pistas, calles de rodaje y plataformas. Crecimiento demanda, mantenimiento, condiciones ambientales adversas, nuevas tecnologías e infraestructura.	Nueva política distinta a la FCFS.	Se maneja integralmente junto con otras capacidades que ofrece.

CAPÍTULO 3:

III METODOLOGÍA

Existe una secuencia de pasos a seguir para construir un modelo de simulación y llevar a cabo pruebas con él, los pasos detallados se presentan en la Figura 3.1.

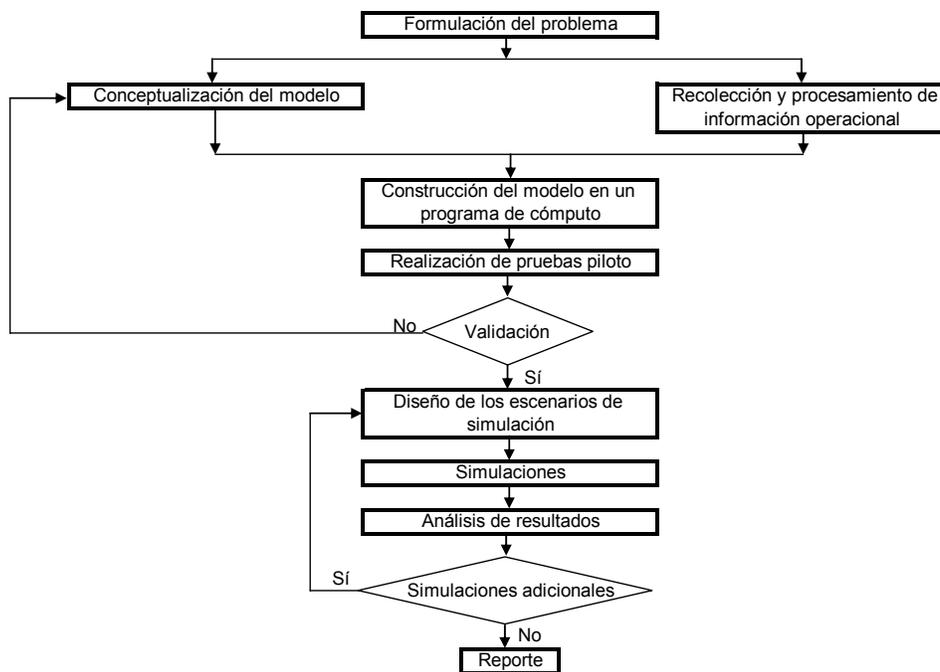


Figura 3.1 Pasos para la elaboración del modelo de simulación y su aplicación.
Fuente: Adaptado de Hillier y Lieberman, 2006; y Law y Kelton, 2006.

A continuación se presenta una descripción de los principales pasos seguidos.

III.1 Formulación del problema

El estudio de simulación debe iniciar con el establecimiento del problema a resolver (inciso I.3). También, se requiere estar familiarizado profundamente con las características y propósito del sistema que va a ser modelado (incisos III.2 y

III.3), con los escenarios que deben ser considerados (inciso III.6) y con los objetivos del estudio (incisos I.4.2 y I.4.3).

Ya en el planteamiento del problema (inciso I.3) se señaló que la principal problemática del sistema aeroportuario nacional es la enorme demanda de servicios a atender en el AICM, por lo que es necesario construir un nuevo aeropuerto. Sin embargo, debido a que todavía no se ha definido incluso su ubicación, el actual aeropuerto deberá operar muy cerca de su capacidad máxima, aún durante varios años, atendiendo la demanda actual y su crecimiento. Esta condición genera diversas dificultades y grandes retos, debido a que los sistemas de transporte presentan un deterioro de servicio significativo, cuando la demanda alcanza alrededor del 80% de su capacidad máxima y además, este deterioro se incrementa exponencialmente conforme la relación demanda/capacidad se aproxima al 100%.

Para ayudar a enfrentar este desafío, se propone construir un modelo de simulación que sirva como una herramienta de planeación y análisis, para establecer medidas preventivas que atenúen las afectaciones y para cuantificar diversas alternativas de mejora operativa.

El modelo debe considerar las principales variables operativas en pistas, calles de rodaje y plataformas del AICM (Figura 3.2). Además, debe simular los despegues y aterrizajes de aeronaves en las pistas 05-L y 05-R y sus movimientos en las calles de rodaje hacia y desde las plataformas de las terminales 1 y 2 (Figura 3.3 y Figura 3.4).

En su operación el modelo debe aplicar la regla de prioridad FCFS y debe identificar los principales tipos de aeronaves, las operaciones realizadas (despegues y aterrizajes), y estimar los tamaños de las líneas de espera y los tiempos de espera en la infraestructura analizada.

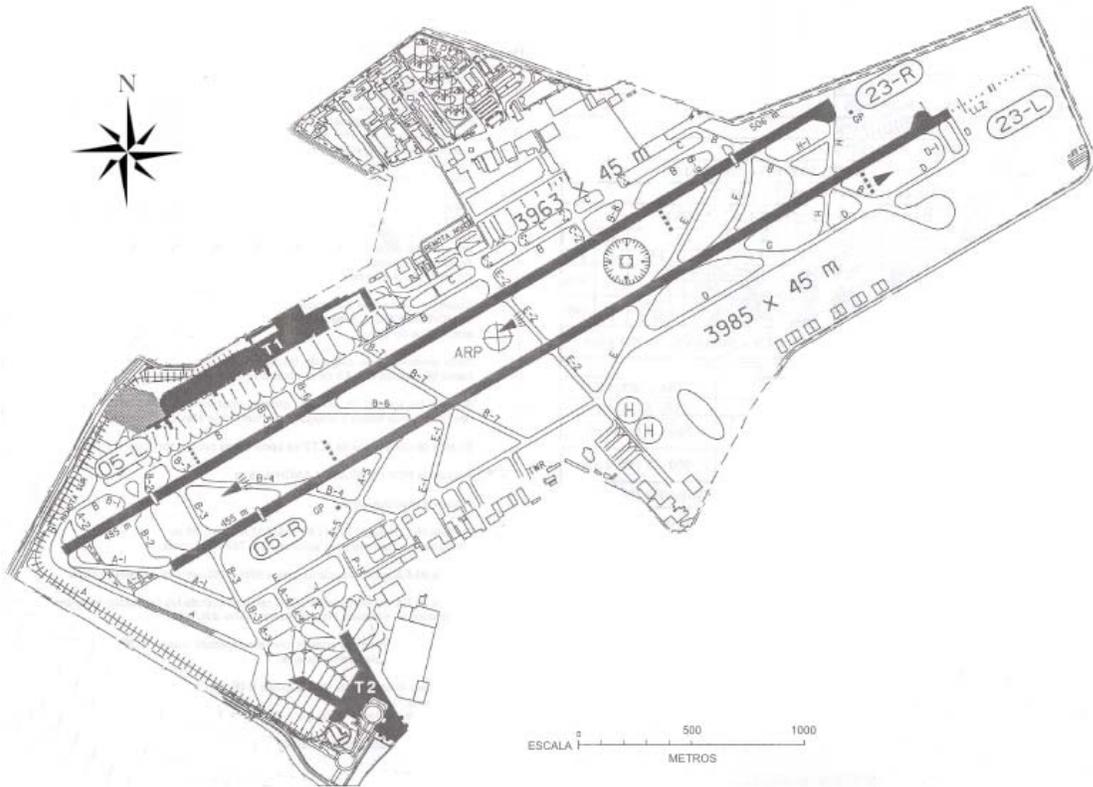


Figura 3.2 Vista en planta del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México.
 Fuente: Adaptado de SENEAM, 2011.

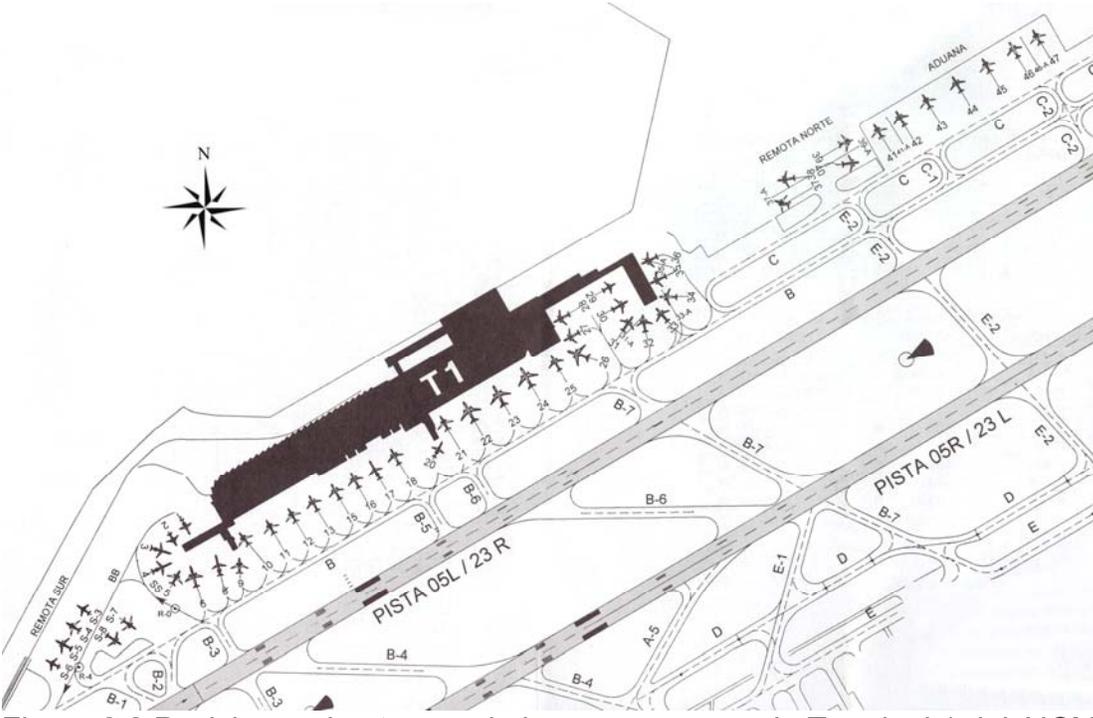


Figura 3.3 Posiciones de atraque de las aeronaves en la Terminal 1 del AICM.
 Fuente: Adaptado de SENEAM, 2011.

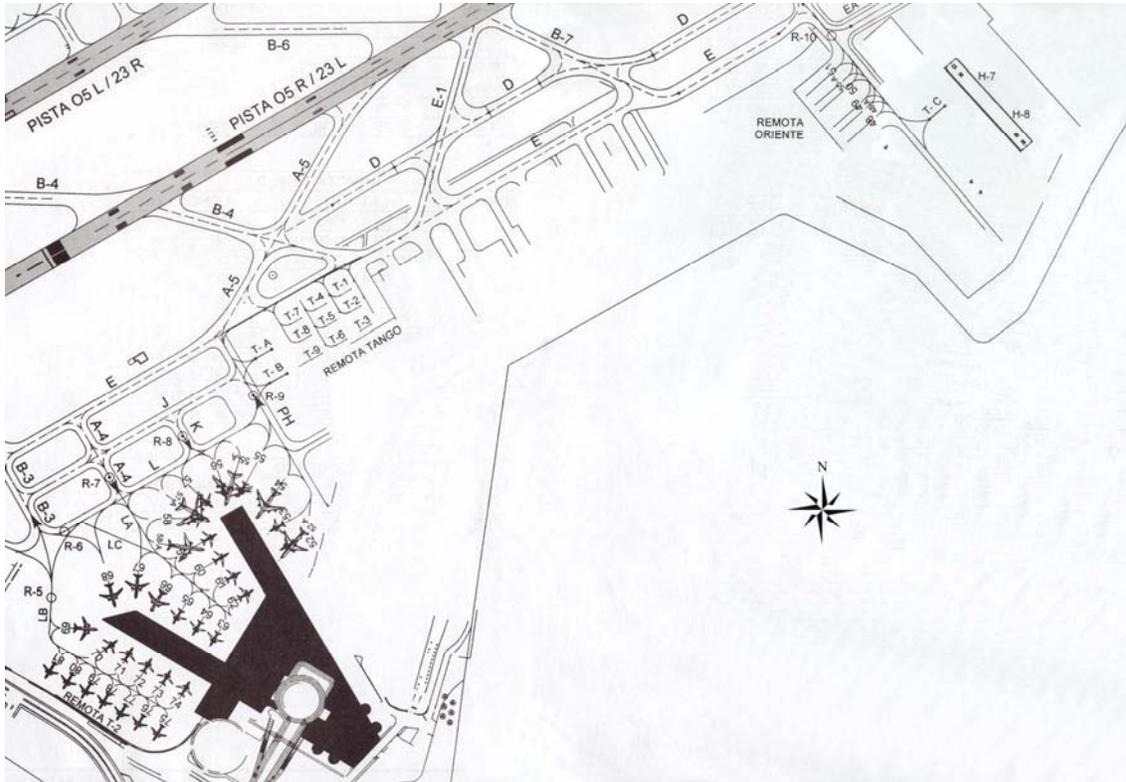


Figura 3.4 Posiciones de atraque de las aeronaves en la Terminal 2 del AICM.
Fuente: Adaptado de SENEAM, 2011.

III.2 Información operacional del AICM

En este inciso se procesó información operacional detallada del AICM, proporcionada por Servicios a la Navegación en el Espacio Aéreo Mexicano (SENEAM) y el Grupo Aeroportuario de la Ciudad de México (GACM), el primero aportó información de la operación en pistas y calles rodaje, y el segundo de la operación en plataformas, debido a que cada uno es responsable de la infraestructura señalada en forma independiente. Con esta información se determinó la capacidad de cada uno de los elementos de la infraestructura bajo estudio y, también, las distribuciones empíricas de los tiempos de llegada y salida de los principales tipos de aeronaves. Posteriormente, se verificó que cada una de estas distribuciones se comportaba como alguna distribución teórica conocida, utilizando para ello pruebas de bondad de ajuste. La información operacional detallada para un día típico (26 de enero de 2011) incluyó: tipo de operación (despegue o aterrizaje), pista utilizada (05-R ó 05-L), número de vuelo, aerolínea,

tipo de aeronave, tipo de vuelo (nacional o internacional) y hora y minuto²⁰ en que inició cada servicio. También, se obtuvo información de las operaciones totales anuales, para el periodo 1967–2010; de las operaciones totales por mes, para los años 2006–2010; y de las operaciones totales por día, para el mes de diciembre de 2010. En cuanto a las operaciones en las plataformas se dispuso de información detallada para todo el año 2010. En este caso, la información obtenida fue: terminal a la que pertenece la plataforma (T1 o T2), nombre y número de la plataforma, tipo de vuelo que se atiende (nacional o internacional), tipo de aeronave y minutos de ocupación.

III.2.1 Comportamiento general de las operaciones de aeronaves

En la Figura 3.5 se muestra el comportamiento de las operaciones totales realizadas en las pistas del AICM, durante el periodo 1967 – 2011. Como se observa sólo durante el intervalo 1967-1979 se presentó un crecimiento sostenido, posteriormente se han presentado fluctuaciones relacionadas directamente con la actividad económica del país y del mundo. Así por ejemplo, en 1981, el panorama económico mundial se afectó abruptamente, debido al desplome de los precios del petróleo y al aumento de las tasas de interés bancarias, por lo cual en 1982 se presentó una fuerte devaluación del peso mexicano, lo cual influyó en la disminución de la actividad aérea en el AICM, a partir de dicho año.

La actividad económica deprimida de los países industriales durante 1981, y sus esfuerzos para acumular petróleo y para sustituirlo con otras fuentes de energía debilitaron el mercado petrolero mundial. Esta situación que persistió en 1982, ocasionó disminuciones en el precio del petróleo y redujo las importaciones de crudo de los países industriales.

²⁰ La hora y minuto de cada operación proporcionada por SENEAM fue en tiempo universal coordinado (UTC), para propósitos del modelo desarrollado se transformó a hora local, que para el AICM corresponde al tiempo estándar del centro (TSC). Como la información de las operaciones corresponde al mes de enero, la hora local se obtuvo restándole seis horas al tiempo universal coordinado (SENEAM, 2011, p. GEN 2.1-3).

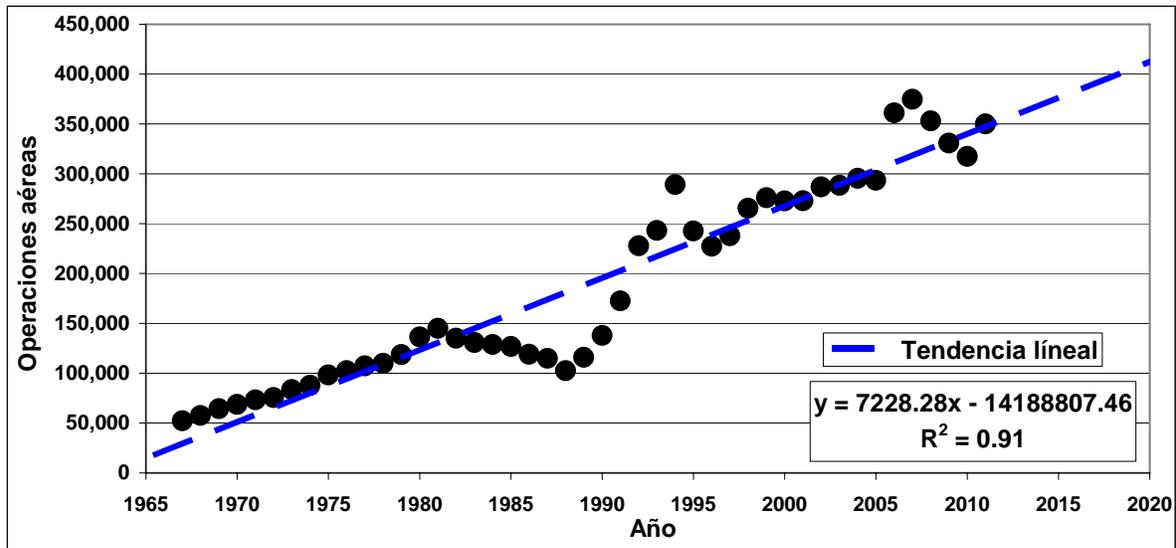


Figura 3.5 Operaciones aéreas en el AICM (1967–2011) y tendencia

Fuente: Elaboración propia con base en: ASA, 1996; DGAC, 2000; y Martínez et al., 2011.

En México, a partir del segundo semestre de 1981 se entró en una fase económica sumamente inestable. La mayor inflación interna respecto de la externa, la dependencia de la economía de los ingresos petroleros y la caída en el precio del energético, afectaron adversamente las expectativas sobre el nivel futuro del tipo de cambio. Con ello se estimuló la conversión de pesos a dólares, se drenaron las reservas internacionales y, en última instancia, se provocó la devaluación de febrero de 1982. A partir del 6 de agosto entró en vigor un sistema de doble tipo de cambio: uno “preferencial” y otro de aplicación general. El tipo de cambio preferencial que se fijó en 49.13 pesos por dólar, se aplicó a la importación de bienes prioritarios, como alimentos y algunos insumos y bienes de capital requeridos para la actividad productiva. También se vendieron al tipo preferencial los dólares destinados al pago de los intereses de la deuda externa pública y privada, y de las obligaciones del sistema bancario mexicano con el exterior. El tipo de cambio general por otra parte, se determinó por el libre juego de la oferta y la demanda de divisas, correspondientes a transacciones no comprendidas en el mercado preferencial. Como parte del Programa Inmediato de Reordenación Económica, la nueva administración que tomó posesión el primero de diciembre de 1982, anunció el establecimiento de otro sistema de control de cambios que incluía la operación de un mercado “controlado” y de otro “libre”. A partir del 20 de

diciembre, la cotización inicial del tipo de cambio controlado fue de 95 pesos por dólar, con un desliz de 13 centavos diarios durante el resto del mes. El mercado libre abrió el mismo día que el controlado a 148.5 pesos por dólar a la compra y 150 a la venta. Estos tipos de cambio de apertura representaron una depreciación, respecto a la cotización del dólar prevaleciente el 17 de febrero de 1982, de 3.5 y 5.6 veces, respectivamente. Una devaluación de la moneda nacional de esta magnitud no tenía precedente en la historia del país, y sus efectos sobre el comportamiento de otras variables reales y financieras de la economía fueron sumamente importantes (Banco de México, 1983, pp. 10, 11, 25, 27, y 28).

Más tarde, la caída en la actividad aérea en 1995 fue originada por la crisis económica iniciada a finales de 1994 en México y que tuvo posteriormente repercusiones mundiales (efecto tequila). En 1994 se suscitaron acontecimientos desfavorables que incidieron marcadamente en la evolución de la economía del país. En el ámbito nacional, eventos políticos y delictivos (por ejemplo, el trágico asesinato del candidato presidencial del Partido Revolucionario Institucional, así como la intensificación de la actitud hostil del Ejército Zapatista de Liberación Nacional) generaron un ambiente de gran incertidumbre que influyó adversamente en las expectativas de los agentes económicos del país y del exterior. Esta situación afectó negativamente la evolución de los mercados financieros y, particularmente, la del cambiario. El 19 de diciembre de 1994 la Comisión de Cambios acordó abandonar el régimen cambiario, estableciéndose un régimen de flotación con efectos a partir del 22 de diciembre de dicho año. Tomando como referencia el tipo de cambio interbancario, el peso mexicano sufrió una depreciación de aproximadamente 71 por ciento en 1994 (Banco de México, 1995, pp. 1, 3, 4 y 5).

La tendencia decreciente en años recientes se asocia con la crisis económica (2008-2011), que se originó en Estados Unidos y que se propagó a varios países del mundo, incluyendo a México, debido a que dicho país es nuestro principal socio comercial. La turbulencia en los mercados financieros

internacionales afectó significativamente el desempeño de la economía global en 2008. A pesar de la implementación de medidas de estímulo monetario y fiscal en un elevado número de países, la tasa de crecimiento del PIB mundial disminuyó de 5.2 por ciento en 2007 a 3.2 por ciento en 2008. En Estados Unidos, la economía entró en una fase recesiva en diciembre de 2007, que se fue agudizando a lo largo de 2008. Los problemas en los mercados financieros se vieron agravados por la quiebra de Lehman Brothers en septiembre de 2008. Este evento dio lugar a un fuerte incremento de la percepción de riesgo global, y aumentó la incertidumbre respecto de la calidad de algunos activos en poder de las instituciones financieras. Así, el costo del crédito interbancario aumentó abruptamente y la liquidez en los mercados financieros cayó aún más. Como resultado de un entorno internacional especialmente adverso, la actividad económica en México fue perdiendo dinamismo durante 2008. En particular, durante los primeros tres trimestres del año, la economía se fue desacelerando como respuesta al gradual deterioro de la demanda externa. No obstante, en los últimos meses del año, el choque de demanda externa se extendió al componente privado del gasto doméstico, lo cual influyó en el dinamismo del PIB y en particular, condujo a que éste mostrara una tasa de crecimiento negativa en el último trimestre (Banco de México, 2009, pp. 11 y 12).

En la Figura 3.5, también se muestra la línea de tendencia para todo el periodo considerado. Se observa que a pesar de las fluctuaciones en el comportamiento de las operaciones realizadas, una tendencia lineal de los datos tiene una alta correlación ($R^2 = 0.91$) además, la prueba de significancia es aceptable (con un nivel de confianza de 95%), con valores de 3.8×10^{-24} para el coeficiente de la variable Año y de 6.4×10^{-24} para la ordenada al origen.

Una revisión de la actividad aérea del AICM durante 2010 mostró que en promedio se realizaron 888 operaciones/día. También, se observó un equilibrio entre la cantidad de llegadas (50.04%) y salidas (49.96%).

En cuanto a las operaciones totales por día, en estudios previos (Herrera, 2001) ya se había detectado que se presenta un comportamiento cíclico semanal, observándose una reducción de las operaciones diarias al inicio de cada semana y una recuperación en el resto de los días. Este comportamiento se sigue manteniendo como se aprecia en la Figura 3.6.

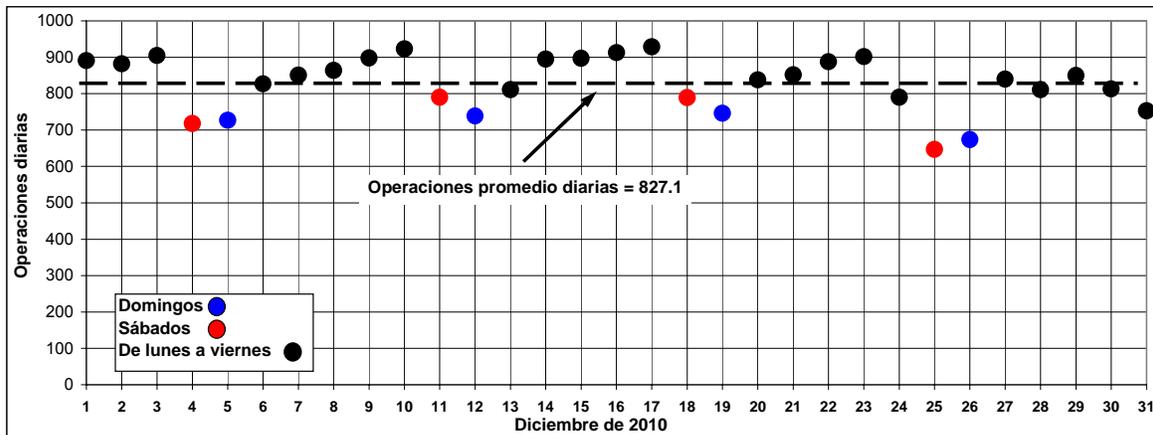


Figura 3.6 Operaciones diarias en el AICM durante el mes de diciembre de 2010
Fuente: Elaboración propia con base en información de SENEAM.

Se debe señalar que para determinar las funciones de densidad de probabilidad de los aterrizajes y despegues, se utilizó la información operativa de un día típico, con objeto de obtener un modelo en el que después se pudieran aplicar los cambios requeridos para los escenarios establecidos, por ejemplo, crecimiento o disminución de la demanda; y modificación de los tipos de aeronaves que operan en el aeropuerto. Por lo anterior, la utilización de un día crítico no sería adecuada. Se definió como día típico, a aquel que tiene un comportamiento común, por lo tanto, excluye a los periodos vacacionales y a los días festivos, debido a que en estos intervalos se incrementa significativamente la demanda; tampoco incluye a los fines de semana, dado que en estos periodos se presenta una reducción de la demanda.

En relación con los movimientos de aeronaves durante un día típico de 2011, se observó que existen dos comportamientos (Figura 3.7). El primero se observó entre las cero y seis horas, en este caso fueron realizadas muy pocas

operaciones aéreas (5.7% del total); el segundo comportamiento se presentó después de las seis y hasta las 24 horas, intervalo en el cual la mayoría de las operaciones fueron realizadas (94.3%). También, durante este día típico se detectaron 36 tipos distintos de aeronaves que realizaron operaciones en las pistas del aeropuerto, sin embargo, sólo seis tipos concentraron el 80% de todas las operaciones aéreas. En cuanto a las clases de aeronaves de acuerdo con su estela de turbulencia, 14% fueron pequeñas, 80.8% grandes y 5.2% pesadas (Cuadro 3.1).

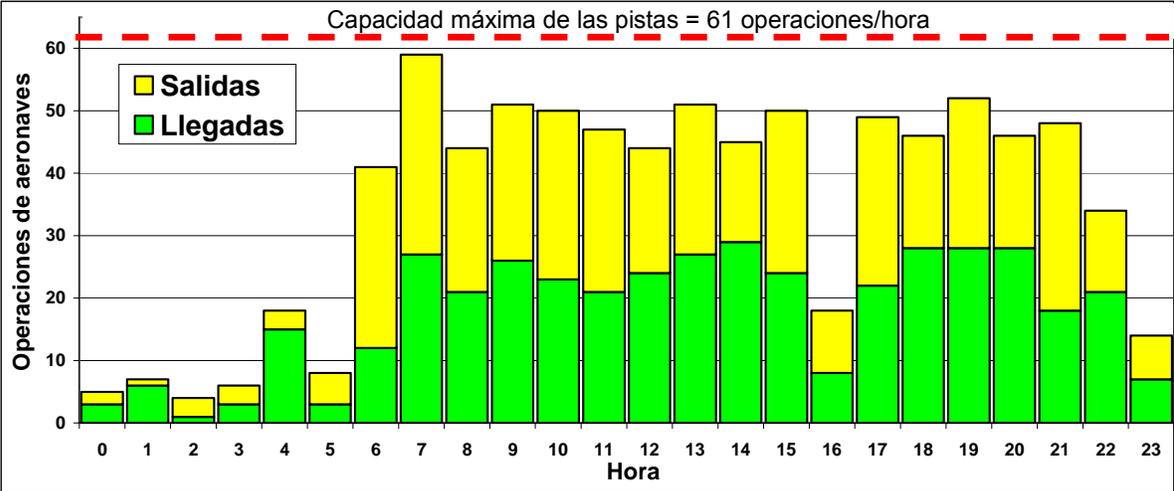


Figura 3.7 Operaciones aéreas en el AICM durante un día típico de enero de 2011
Fuente: Elaboración propia con base en información de SENEAM.

La clase de las aeronaves por estela de turbulencia se estableció en función de su máximo peso de despegue certificado (maximum certificated takeoff weight, MCTOW). Los estándares actuales en los Estados Unidos, que son los aplicados en México y en muchos países del mundo, consideran tres clases (FAA, 2010): aeronaves pesadas, aquellas con capacidad para el despegue con un peso mayor a 255,000 libras (115.9 toneladas); aeronaves grandes con un peso mayor a 41,000 libras (18.63 toneladas) y hasta 255,000 libras (115.9 toneladas); y aeronaves pequeñas con un peso igual o menor a 41,000 libras (18.63 toneladas).

Cuadro 3.1 Tipos y clases de aeronaves que operan diariamente en el AICM

Tipo de aeronave		Cantidad	Porcentaje		Clase
			Del total	Acumulado	
1	Boeing 737	196	23.42%	23.42%	Grande
2	Embraer ERJ-145	172	20.55%	43.97%	Grande
3	Airbus 320	114	13.62%	57.59%	Grande
4	ATR-42	79	9.44%	67.03%	Pequeña
5	Boeing 737-800	65	7.77%	74.79%	Grande
6	Embraer EMB-190	47	5.62%	80.41%	Grande
7	Airbus 319	46	5.50%	85.90%	Grande
8	MD-80	15	1.79%	87.69%	Grande
9	Boeing 777-200	10	1.19%	88.89%	Pesada
10	Boeing 757-200	9	1.08%	89.96%	Grande
11	Boeing 767-300	9	1.08%	91.04%	Pesada
12	Swearingen SA-226TB	8	0.96%	92.00%	Pequeña
13	Airbus 300	6	0.72%	92.71%	Pesada
14	Boeing 747	6	0.72%	93.43%	Pesada
15	Boeing 767-200	6	0.72%	94.15%	Pesada
16	De Havilland Canada DHC-6 Twin Otter	5	0.60%	94.74%	Pequeña
17	552 Citation II	4	0.48%	95.22%	Pequeña
18	CASA/IPTN CN-235	4	0.48%	95.70%	Pequeña
19	Gulfstream II and III	4	0.48%	96.18%	Grande
20	North American NA-265 Sabreliner 40	4	0.48%	96.65%	Pequeña
21	Bombardier CRJ100 and 200	3	0.36%	97.01%	Grande
22	De Havilland Canada DHC-8-200 Dash 8	3	0.36%	97.37%	Pequeña
23	Airbus 340-300	2	0.24%	97.61%	Pesada
24	Airbus 340-640	2	0.24%	97.85%	Pesada
25	Antonov AN-32	2	0.24%	98.09%	Grande
26	DC-8-72	2	0.24%	98.33%	Pesada
27	Dornier 328	2	0.24%	98.57%	Pequeña
28	IL-18	2	0.24%	98.81%	Grande
29	Learjet 24	2	0.24%	99.04%	Pequeña
30	Learjet 35	2	0.24%	99.28%	Pequeña
31	Boeing 727-200	1	0.12%	99.40%	Grande
32	IAI Arava	1	0.12%	99.52%	Pequeña
33	Learjet 25	1	0.12%	99.64%	Pequeña
34	Learjet 45	1	0.12%	99.76%	Pequeña
35	Learjet 60	1	0.12%	99.88%	Pequeña
36	MD-11	1	0.12%	100.00%	Pesada
	Totales	837	100.00%		

Fuente: Elaboración propia con base en información de SENEAM.

Dado que el modelo de simulación desarrollado considera las operaciones de las aeronaves hacia y desde las plataformas, a continuación se dan detalles de

su arreglo. El AICM posee 107 posiciones de atraque en sus plataformas; cincuenta y seis corresponden a la Terminal 1 y cincuenta y una a la Terminal 2 (Figuras 3.3 y 3.4). En la Terminal 1, cuarenta y cuatro posiciones son de contacto y doce son remotas²¹; y en la Terminal 2, veintisiete son de contacto y veinticuatro remotas.

A la Terminal 1 corresponde: la plataforma de la Aduana (ocho posiciones); la del edificio principal de la terminal, la cual se subdivide en Principal Nacional (dieciséis posiciones), Principal Internacional (once posiciones) y Principal Mixta (nueve posiciones); la Remota Norte (seis posiciones); y la Remota Sur (seis posiciones).

Por su parte, a la Terminal 2 corresponde la plataforma de los Dedos Norte y Sur del edificio principal (veintisiete posiciones); la plataforma Remota T-2 (siete posiciones); la Remota Oriente (seis posiciones); y la Remota Tango (once posiciones). En el Cuadro 3.2 se presenta un resumen de los tiempos de ocupación promedio de las aeronaves en las distintas plataformas y posiciones de atraque.

Cuadro 3.2 Tiempos de ocupación promedio de las aeronaves en las plataformas y posiciones de atraque del AICM

Terminal	Plataforma	Posiciones	Ocupación promedio (minutos/aeronave)
T1	Principal nacional	1 a 6, 8 a 13, y 15 a 18	37.56
T1	Principal mixta	20 a 28	54.74
T1	Principal internacional	29 a 31, 31-A, 32, 33, 33-A, 34, 35, 35-A y 36	59.12
T1	Remota Norte	37, 37-A, 38, 39, 39-A y 40	64.80
T1	Aduana	41 a 46, 46-A y 47	61.58
T1	Remota Sur	S-03 a S-08	52.44
T2	Remota Oriente	48, 48-A, 49, 50, 50-A y 51	42.27
T2	Dedos Norte y Sur	52, 52-A, 53 a 55, 55-A, 56, 57, 57-A, 58, 58-A, 59 a 74	43.44
T2	Remota T-2	75 a 81	36.91
T2	Remota Tango	T1 a T9, T-A y T-B	27.92

Fuente: Elaboración propia con base en información de GACM.

²¹ Las posiciones de contacto son aquellas en las que un aeropasillo conecta directamente a la terminal con las aeronaves; por el contrario, las remotas no tienen conexión directa entre la terminal y las aeronaves.

III.2.2 Distribuciones empíricas de los tiempos de llegada y salida para los principales tipos de aeronaves, y pruebas de bondad de ajuste

Con base en información operativa detallada proporcionada por SENEAM, fueron estimados los tiempos entre llegada y salida, de los aterrizajes y despegues, para las principales aeronaves que operan en el AICM. Posteriormente, esta información fue resumida en histogramas de distribución de frecuencias, y de éstas se obtuvieron las funciones de densidad de probabilidad (fdp) empírica asociadas. Después, mediante pruebas de bondad de ajuste, las fdp empíricas fueron evaluadas mediante fdp teóricas conocidas.

Con objeto de determinar cuál distribución de probabilidad representaba mejor a cada conjunto de datos, fueron consideradas más de 20 diferentes tipos de distribuciones. Sin embargo, sólo siete de ellas fueron las mejores (beta, Erlang, gamma, Johnson SB, lognormal, Pearson tipo 6 y Weibull). Como se señaló antes, se observaron dos comportamientos en la operación típica del AICM, por esta razón fueron considerados dos submodelos diferentes, uno para el intervalo entre las 00:00 y 06:00 horas (submodelo 1), y el otro para el intervalo entre las 06:00 y 24:00 horas (submodelo 2). Las fdp utilizadas en el modelo de simulación se muestran en los Cuadros 3.3 y 3.4. Cabe señalar que el formato de las distribuciones en los cuadros, corresponde al que maneja el programa de simulación utilizado (Flexsim). Para la distribución Beta y Johnson SB los parámetros son: punto final más bajo, punto final más alto, forma #1 y forma #2; para la Gamma, Erlang, Lognormal y Weibull son: localización, escala y forma; y para la Pearson T6 son: localización, escala, forma #1 y forma #2 (Averill, 2011).

Para algunos tipos de aeronaves hubo menos de diez registros de operaciones realizadas, durante cada intervalo analizado, en esos casos las fdp se establecieron para las diferentes clases de aeronaves (pesada, grande y pequeña), agrupando a diversos tipos. Este fue el caso de todas las distribuciones para el intervalo entre las 00:00 y 06:00 horas, tanto en llegadas como en salidas y también de algunos casos para el siguiente intervalo.

Cuadro 3.3 Funciones de densidad de probabilidad para las llegadas

Para el intervalo entre las 00:00 y 06:00 horas:	
Distribución	Tipo de aeronave
Beta (0.8186, 121.6, 0.5006, 5.317)	Diversas de las tres clases
Para el intervalo entre las 06:00 y 24:00 horas:	
Distribución	Tipo de aeronave
Gamma (0.0, 36.55, 1.192)	Airbus A319
Pearson T6 (0.7073, 1881.9, 0.8533, 98.48)	Airbus A320
Weibull (0.0, 24.37, 1.165)	ATR-42
Erlang (0.9220, 10.62, 1.0)	Boeing 737
Lognormal (0.0, 15.55, 1.090)	Boeing 737-800
Johnson SB (0.0344, 311.8, 1.557, 0.6242)	Embraer EMB-190
Weibull (0.5278, 10.83, 0.8915)	Embraer ERJ-145
Johnson SB (2.469, 539.9, 1.700, 0.5790)	Diversas de clase pesada
Gamma (3.819, 105.9, 0.7767)	Diversas de clase grande
Beta (0.8530, 413.4, 0.5496, 3.784)	Diversas de clase pequeña

Cuadro 3.4 Funciones de densidad de probabilidad para las salidas

Para el intervalo entre las 00:00 y 06:00 horas:	
Distribución	Tipo de aeronave
Johnson SB (0.9089, 68.63, 0.7382, 0.4198)	Diversas de las tres clases
Para el intervalo entre las 06:00 y 24:00 horas:	
Distribución	Tipo de aeronave
Weibull (0.6180, 46.16, 0.8675)	Airbus A319
Johnson SB (0.0132, 101.8, 1.525, 0.7471)	Airbus A320
Weibull (0.0, 23.89, 1.100)	ATR-42
Weibull (0.5622, 10.28, 0.8688)	Boeing 737
Beta (0.5616, 89.78, 0.5861, 1.198)	Boeing 737-800
Lognormal (0.6311, 14.37, 1.537)	Embraer EMB-190
Erlang (0.0, 11.72, 1.0)	Embraer ERJ-145
Lognormal (1.783, 12.79, 1.860)	Diversas de clase pesada
Pearson T6 (0.1801, 209.4, 1.065, 4.835)	Diversas de clase grande
Pearson T6 (0.0, 129.2, 1.129, 2.721)	Diversas de clase pequeña

Observe que para el intervalo entre las 06:00 y 24:00 horas, las siete primeras distribuciones corresponden a tipos de aeronaves específicos, que representan el 85.9% del total de todos los tipos detectados. El resto de las aeronaves se agrupó por clase, como se señaló en el párrafo anterior.

Por último, se aplicaron las pruebas de bondad de ajuste Anderson-Darling y Kolmogorov-Smirnov para obtener una evaluación formal de las distribuciones que mejor se ajustaban. En todos los casos se obtuvieron valores

satisfactorios al compararse con los valores críticos, considerando un nivel de significancia $\alpha = 0.05$. Los tamaños de las muestras utilizados fluctuaron entre 11 y 88 aeronaves.

En relación con las distintas fdp utilizadas para el proceso de ajuste de los tiempos de llegada y salida de aeronaves, es interesante señalar que todas estas distribuciones han sido utilizadas para modelar duraciones de tiempo en diversas aplicaciones (Law & Kelton, 2006; y SIMPROCESS, 2011). Algunos ejemplos de sus aplicaciones son: el tiempo necesario para terminar una actividad, como puede ser un servicio o una reparación (Gamma, Weibull, Pearson T6); el tiempo de espera para que ocurran n registros tipo Poisson (Erlang); el tiempo para la siguiente falla de una máquina o equipo (Weibull); y el tiempo requerido para terminar una actividad, cuando los tiempos esperados están en un intervalo definido $[a, b]$, como sucede en la técnica PERT (Program Evaluation and Review Technique) para la administración de proyectos (Beta, Johnson SB). Algunas actividades cuya duración puede tener una gran cantidad de valores, como en el caso de la licencia médica de un trabajador debida a enfermedad, han sido modeladas satisfactoriamente mediante la distribución Lognormal (Evans, et al., 2000). Además, estas fdp tienen algunas similitudes en sus definiciones. Por ejemplo, la distribución Erlang es un caso especial de la distribución Gamma, cuando el parámetro de forma es un entero positivo. Las distribuciones Gamma y Weibull son las mismas, cuando el parámetro de forma es igual a 1, y el parámetro de escala coincide, es decir $\text{Gamma}(1, b) = \text{Weibull}(1, b)$; de hecho, las distribuciones $\text{Gamma}(1, b)$ y $\text{Weibull}(1, b)$, son exactamente iguales a la distribución Exponencial (b), que corresponde al modelo clásico de los tiempos de espera utilizado en teoría de colas (Upton y Cook, 2002).

III.3 Modelo conceptual

En esta etapa se definieron qué aspectos del sistema fueron representados en el modelo y cuáles no. Además, se estableció con qué nivel de

detalle se haría dicha representación. No es necesaria una copia paso a paso entre el modelo y el sistema real, sólo es necesaria su esencia.

El AICM tiene dos pistas paralelas (Figura 3.2), la cinco derecha (05-R) que está equipada con el sistema de aterrizaje por instrumentos (Instrument Landing System, ILS) y la cinco izquierda (05-L), ambas tienen una orientación de cincuenta y dos grados. El ILS guía a los pilotos de las aeronaves hacia la pista de aterrizaje, principalmente cuando hay mala visibilidad (lluvia, niebla, etcétera). Las mismas pistas pero en su rumbo recíproco son las pistas veintitrés izquierda (23-L) y veintitrés derecha (23-R). Igualmente, la pista 23-L es la equipada con el ILS. La separación de 310 metros que tienen las pistas no permite, por seguridad, operaciones simultáneas, sólo secuenciales. Regularmente se utiliza la pista 05-L para despegues y la 05-R para aterrizajes.

Sin embargo, ocasionalmente algunos pilotos solicitan despegar en la pista 05-R, principalmente cuando sus aeronaves están muy cerca de su peso máximo de despegue, y también en ocasiones algunos aterrizajes se realizan en la pista 05-L.

Del mismo modo, la pista 23-L se utiliza regularmente para aterrizar y la 23-R para despegar. La utilización de las pistas cinco o veintitrés depende de la velocidad y dirección del viento. La regla seguida es que las operaciones de despegue y aterrizaje se deben realizar siempre en contra de la dirección del viento. En general, cuando el viento está en calma el controlador escoge las pistas cinco. Regularmente se escogen las pistas cinco, porque de esta forma se tiene la distancia más corta para llegar a las cabeceras de las pistas, desde las dos terminales; en cambio sucede lo opuesto considerando las pistas veintitrés. De hecho, las pistas cinco son las más utilizadas, aproximadamente se utilizan en el 91% de las operaciones aéreas. Solamente en las épocas de lluvias o durante los meses de febrero y marzo, que es cuando hay muchísima inestabilidad en la dirección del viento, se utilizan las pistas veintitrés. Cuando los despegues y

aterrizajes se realizan en las pistas 05-L y 05-R, bajo buenas condiciones meteorológicas, la capacidad máxima del conjunto de ambas pistas es de 61 operaciones por hora.

La calle de rodaje por la que desalojan las aeronaves después de aterrizar, depende de la habilidad del piloto y del tipo de aeronave. En general, cuando las aeronaves aterrizan en la pista 05-R y van a la Terminal 1, desalojan por el rodaje F (Fox), y las que se dirigen a la Terminal 2, desalojan en el rodaje G (Golfo). Sin embargo, se presentan casos, cuando las aeronaves van a la Terminal 1, en los que pueden desalojar por el primer rodaje E (Eco), el cual es recto, o por el rodaje B (Bravo), pero debido a su diseño más favorable (curvo), el rodaje Fox es el que se utiliza regularmente. En cualquier opción utilizada, calle de rodaje E, F o B, las aeronaves no deben cruzar la pista 05-L cuando esté en operación. En cambio, en el caso de los aterrizajes en la pista 05-L, el rodaje utilizado comúnmente para salir de esta pista, cuando las aeronaves van a la Terminal 1, es el B-8 (Bravo-8).

La longitud de pista requerida en los despegues depende del tipo de aeronave, generalmente despegan a la altura de la calle E-2, pero en ocasiones puede ser un poco antes, cuando se trata de una aeronave ligera o con poca carga. En cambio, una aeronave pesada, por ejemplo, un Boeing-747 que deja mayor turbulencia, despegue hasta el último tercio de la pista.

Las aerolíneas que llegan a la Terminal 1 son: AeroUnion, Air France, Air France Cargo, America West, American Airlines, Avianca, British Airways, Cargolux, Cubana, DHL, Iberia, Interjet, KLM, Lacsá, Magnicharter, Mas Air, United Airlines, UPS, Viva Aerobus, y Volaris. Cabe señalar que en las posiciones 41 a 47 de la Terminal 1 está la zona de aduana. Todos los vuelos con carga internacional llegan a estas posiciones. Por otro lado, a la Terminal 2 llegan las siguientes aerolíneas: Aero República, Aerolitoral, Aeromar, Aeroméxico,

Continental Airlines, Continental Express, COPA, Delta Airlines, Estafeta, Global Air, Lan Chile, Lan Perú, y Travel²².

El modelo propuesto representa las características operacionales del aeropuerto cuando las pistas 05-L y 05-R están en servicio. La Figura 3.8 muestra los elementos del sistema que forman el modelo conceptual utilizado y presenta más detalles de las distribuciones porcentuales de las distintas operaciones de aeronaves en las pistas, calles de rodaje y terminales; las direcciones de los flujos de aeronaves; las capacidades generales de los componentes a simular y las restricciones operacionales en el sistema.

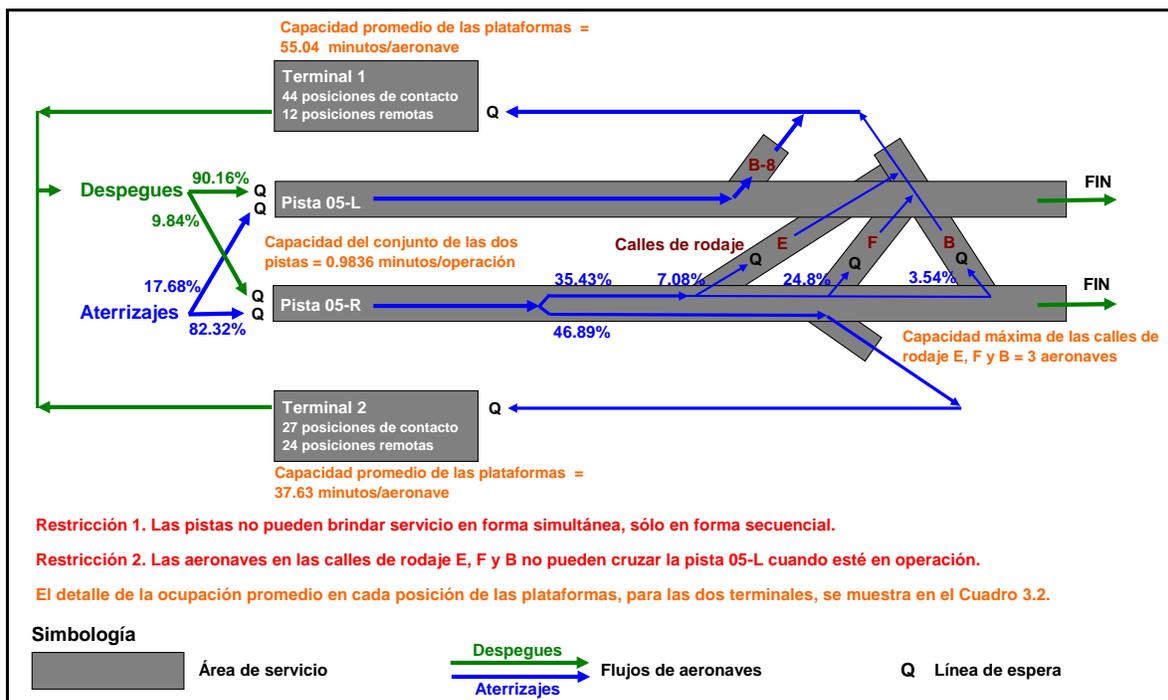


Figura 3.8 Modelo conceptual del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México

²² Información proporcionada por personal de SENEAM en entrevista realizada el 9 de febrero de 2011, en sus instalaciones del AICM. La entrevista fue con el ingeniero José Antonio Villanueva Solís, Gerente Regional Centro; y el Controlador de Tránsito Aéreo, José Arturo Enríquez Ávila. También, aportaron información otros controladores de la torre de control del AICM.

III.4 Construcción del modelo de simulación en un programa de cómputo

En esta etapa, el modelo conceptual especificado en el inciso anterior, fue codificado en un programa de cómputo²³. Para ello, las distribuciones de llegadas y salidas obtenidas en el inciso III.2.2 fueron incorporadas al modelo conceptual. Debido al comportamiento de las operaciones se elaboraron dos submodelos, uno para el periodo entre las 00:00 y 06:00 horas, y otro para el periodo de las 06:00 a las 24:00 horas. La disciplina utilizada en el modelo, tanto para las llegadas como para las salidas, fue la regla tradicional FCFS. En general para construir el modelo se utilizó la guía del usuario del programa (Flexsim Software Products, 2010). Las figuras incorporadas en tercera dimensión, para la visualización en el modelo de las terminales y de las aeronaves, fueron creadas mediante el programa SketchUp, versión 8.

En el modelo fueron utilizadas como unidades base de tiempo, los minutos, por ello, el tiempo de simulación del primer submodelo fue de 360 unidades (minutos), es decir seis horas; y para el segundo, fue de 1,080 unidades (minutos), lo que representa las restantes dieciocho horas de operación diaria. En la escala utilizada para la visualización del modelo, cada unidad de la cuadrícula de éste, representa cuatro metros. Las velocidades de las aeronaves en pistas, rodajes y plataformas se establecieron con base en datos de campo, en el AICM, y de Galíndez, et al. (2007); los valores utilizados se muestran en el Cuadro 3.5. La pendiente de aproximación final de las aeronaves, en los aterrizajes, y la de ascenso, en los despegues, fue de 2% (Galíndez, et al., 2007).

En las Figuras 3.9 a 3.11 se muestran algunas vistas y perspectivas del modelo desarrollado. La documentación del modelo del AICM utilizada en el programa Flexsim se presenta en el Apéndice A.2.

²³ En este trabajo fue utilizado el programa de simulación Flexsim, versión 5.

Cuadro 3.5 Velocidades promedio utilizadas en el modelo de simulación del AICM

Elemento del modelo	Condición	Velocidad promedio real		Velocidad promedio utilizada en el modelo ³ = Velocidad promedio real/4
		km/hora	m/minuto	metros/minuto
Pistas ¹	Inicio de aterrizaje	220.8	3,680	920
	En el punto de rotación de la aeronave ²	220.8	3,680	920
Calles de rodaje E, F y B	Entrada	38.4	640	160
Rodajes hacia las plataformas	Entrada	55.2	920	230
	Dentro	48.0	800	200
	Salida	30.0	500	125
Plataformas	Dentro	12.0	200	50
	En posiciones de ataque	2.4	40	10

Notas:

1. Se consideraron aceleraciones para los despegues de 4,000 metros/minuto² (equivalente a 1.11 m/s²); y de la misma magnitud, pero de sentido contrario para los aterrizajes. Los valores introducidos en el modelo consideran el factor de escala, por lo que la aceleración utilizada fue de 1,000 metros/minuto² (0.277 m/s²)
2. El punto de rotación, es aquel en donde la aeronave en su carrera de despegue levanta la nariz, poco antes de elevarse sobre la pista.
3. Las velocidades introducidas en el modelo consideran la escala utilizada. Cada unidad de longitud en el modelo representa cuatro metros.

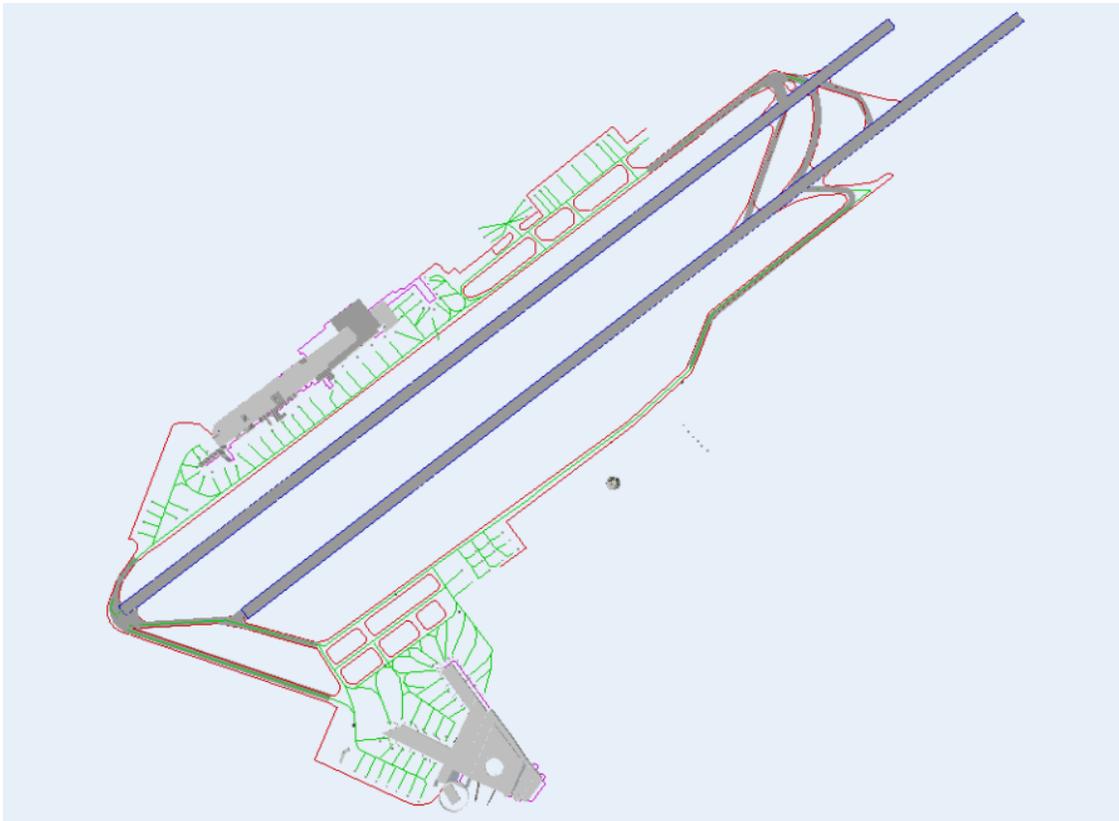


Figura 3.9 Vista en planta del modelo del AICM desarrollado

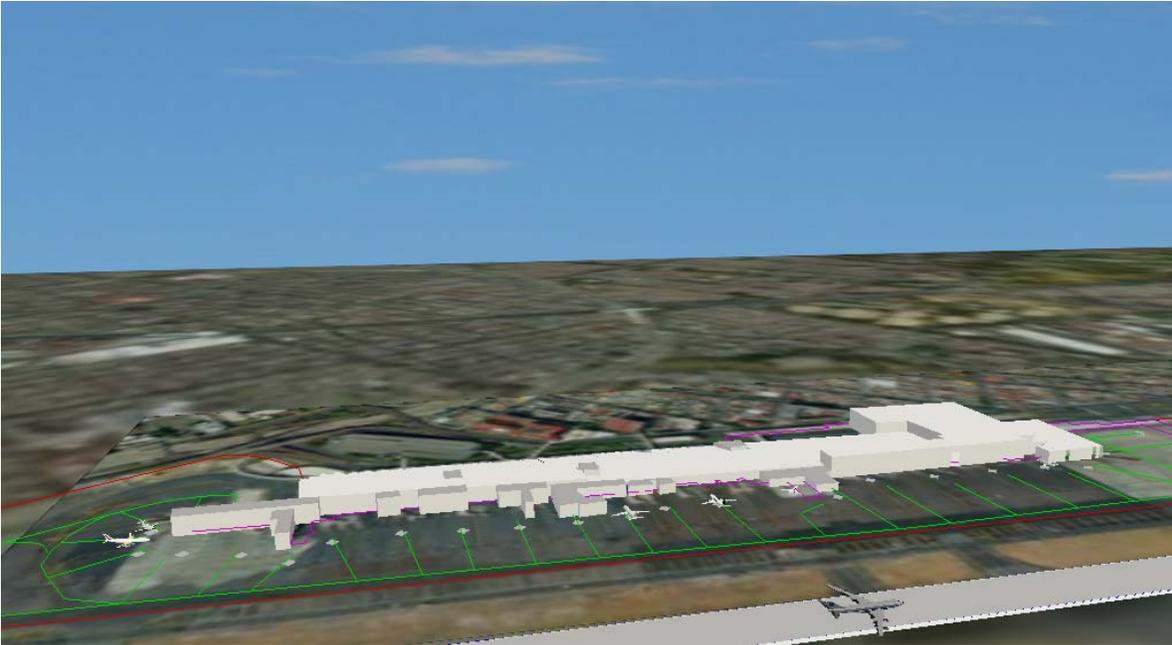


Figura 3.10 Perspectiva del modelo de la Terminal 1

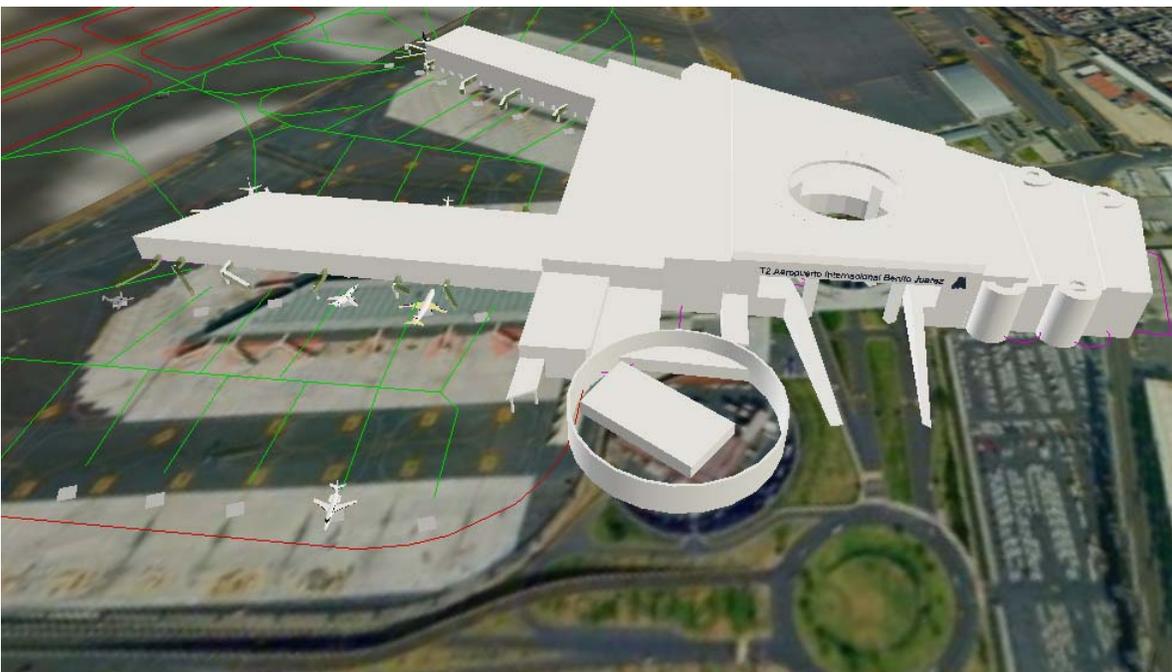


Figura 3.11 Perspectiva del modelo de la Terminal 2

III.5 Pruebas piloto y validación del modelo

Las pruebas piloto son simulaciones que tienen como finalidad incrementar la experiencia del modelador y observar en forma preliminar los

resultados de salida del modelo, tanto cualitativa como cuantitativamente. Estos resultados también sirven para planear varios aspectos de las simulaciones que se harán posteriormente, al aplicar el modelo final en los escenarios de interés. Se dice que un modelo es válido si representa adecuadamente al sistema que está siendo modelado.

Como el modelo desarrollado es para un sistema existente, el AICM, la validación se obtuvo al comparar los resultados de las simulaciones, contra los datos del comportamiento del sistema real. Si el comportamiento entre el modelo y el sistema real es estadísticamente consistente, el modelo es válido.

Inicialmente, se realizaron algunas pruebas piloto y ajustes menores para afinar el modelo. Posteriormente, con objeto de validarlo, los resultados de varias corridas fueron comparadas contra la información del sistema real. Las comparaciones tuvieron la finalidad de asegurar que las operaciones aéreas generadas por el modelo de simulación, se presentan en la proporción y momento adecuados. Para ello, en particular se compararon las diferentes proporciones de tipos y operaciones de aeronaves, y los tiempos de inicio de las operaciones en las pistas que genera el modelo, contra los valores observados (reales) en el AICM.

La Figura 3.12 muestra una comparación entre los tiempos reales de aterrizajes y despegues en las pistas del AICM, y los tiempos estimados mediante el modelo de simulación. Observe que fueron graficados los resultados de 10 pruebas y que en cada una se consideró una operación diaria de 1,440 minutos, (24 horas).

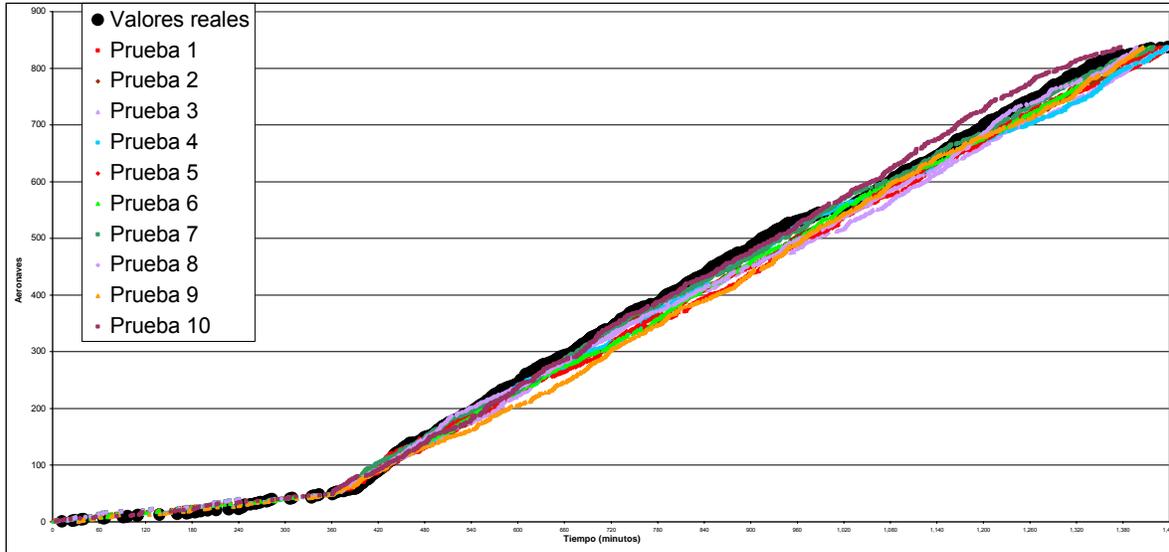


Figura 3.12 Operaciones aéreas reales en las pistas del AICM y resultados de diez pruebas con el modelo desarrollado

En relación con los principales tipos de aeronaves, el Cuadro 3.6 muestra las proporciones de operaciones de acuerdo con los valores reales y las generadas mediante el modelo de simulación. Los resultados con el modelo fueron obtenidos al promediar los valores de diez pruebas. Esta tabla también presenta el error típico de dichos valores. Observe que los valores obtenidos con el modelo de simulación son muy similares a los valores reales y que en todos los casos el error típico nunca fue mayor a 0.43%.

Cuadro 3.6 Participación de los principales tipos de aeronaves en las operaciones del AICM, considerando los valores reales y los resultados del modelo de simulación

Aeronave	Valores reales	Resultados del modelo de simulación	
		Promedio	Error típico
Boeing 737	23.42%	21.96%	0.17%
Embraer ERJ-145	20.55%	21.83%	0.40%
Airbus 320	13.62%	13.76%	0.33%
ATR-42	9.44%	11.44%	0.35%
Boeing 737-800	7.77%	8.46%	0.37%
Embraer EMB-190	5.62%	5.73%	0.43%
Airbus 319	5.50%	5.28%	0.29%

También, es importante que el modelo de simulación genere los diferentes tipos de operaciones aéreas, aterrizajes y despegues, de acuerdo con las proporciones reales. En este caso los promedios de diez pruebas de simulación estimaron 49.86% aterrizajes y 50.14% despegues, valores que son muy similares a los reales, 50.04% y 49.96% respectivamente.

III.6 Diseño de los escenarios de simulación

En este inciso se planearon los escenarios a evaluar con el modelo desarrollado, en particular, se definieron las condiciones bajo las cuales se hicieron las simulaciones y se señalaron los detalles relevantes. En general se indica porqué y cómo se realizó cada escenario.

Mediante estos escenarios se evaluaron cuantitativamente diversas condiciones que afectan negativamente el desempeño del AICM, pero también se estimaron los efectos de cambios operativos que lo mejoran. Dichas estimaciones se establecieron, en términos de tiempos de espera, tamaños de colas y costos. En el caso de las afectaciones, la información obtenida puede servir para establecer medidas preventivas, y en el caso de las mejoras, para justificar la viabilidad de su implementación. En todos los casos, los resultados y su discusión se presentan en el Capítulo 4.

Las estimaciones obtenidas mediante el modelo consideraron los siguientes escenarios:

1. Impacto originado por el crecimiento natural de la demanda de servicio.
2. Efectos de las labores de mantenimiento en las pistas.
3. Efectos de la presencia de condiciones ambientales adversas.
4. Efecto de la aplicación de una nueva tecnología para incrementar la capacidad de las pistas.
5. Efecto de la utilización intensiva de aeronaves de mayor capacidad.
6. Efecto de la incorporación de infraestructura nueva.
7. Impacto de una nueva estrategia para atender a las aeronaves durante las fases de despegue y aterrizaje.

Observe que los primeros tres escenarios se relacionan con aspectos operativos del aeropuerto, y los restantes cuatro con su planeación. Los escenarios señalados son ilustrativos y no limitativos de la aplicación del modelo. También, existe la posibilidad de establecer escenarios en donde se consideren distintas condiciones en forma simultánea. Por ejemplo, en donde se estime el efecto del crecimiento de la demanda y a la vez se incorpore nueva infraestructura.

III.6.1 Impacto originado por el crecimiento natural de la demanda de servicio

Es importante conocer el comportamiento del AICM conforme aumenta el número de operaciones en sus pistas, con objeto de planear las acciones necesarias para evitar o reducir los efectos no deseados, como son entre otros, las demoras, la cancelación de vuelos y los accidentes. Al incrementarse la demanda de servicio en las pistas, también aumenta el tamaño de las líneas de espera de las aeronaves y los tiempos de espera. Mediante este escenario se estimó cuantitativamente la magnitud de estos incrementos. Para ello, se consideró que la capacidad de las pistas del aeropuerto es fija, con un valor igual a 61 operaciones por hora, y también que el incremento de la demanda de los servicios de aterrizaje y despegue aumenta en la misma proporción para todos los tipos de aeronaves.

Con objeto de reflejar los incrementos de la demanda de servicio en el modelo de simulación, inicialmente fueron modificados los valores de los tiempos promedio entre llegada y salida de los principales tipos de aeronaves, para establecer nuevas fdp que generan una demanda igual a 1,464 operaciones por día, la cual corresponde a la capacidad máxima de las pistas. Las fdp utilizadas se presentan en los Cuadros 3.7 y 3.8. Observe que los valores en todos los casos son funciones exponenciales que se obtuvieron como resultado del cociente entre el intervalo de interés, de baja o alta actividad (360 ó 1080 minutos), y el máximo número de operaciones que se pueden realizar en dichos intervalos, de acuerdo

con la capacidad máxima de las pistas para cada tipo de aeronave. Para efectos de las simulaciones, en el modelo desarrollado se incorporaron las nuevas fuentes que generan una demanda igual al 100% de la capacidad de las pistas, y se agregó después de éstas un sumidero que elimina la demanda no requerida, de acuerdo con un porcentaje preestablecido. Estos porcentajes, se fueron cambiando de acuerdo con el incrementando de la demanda requerida. La finalidad del sumidero es sólo la de dosificar el tamaño de la demanda para el escenario.

Cuadro 3.7 Funciones de densidad de probabilidad, que generan una demanda igual al 100% de la capacidad máxima de las pistas, para las llegadas

Distribución	Tipo de aeronave	Tamaño del intervalo (minutos)	Máximo número de operaciones
Intervalo entre las 00:00 y 06:00 horas: Exponencial (1.525)	Diversas de las tres clases	360	236
Intervalo entre las 06:00 y 24:00 horas: Exponencial (41.53)	Airbus A319	1080	26
Exponencial (13.67)	Airbus A320	1080	79
Exponencial (19.28)	ATR-42	1080	56
Exponencial (8.503)	Boeing 737	1080	127
Exponencial (27.00)	Boeing 737-800	1080	40
Exponencial (32.72)	Embraer EMB-190	1080	33
Exponencial (8.925)	Embraer ERJ-145	1080	121
Exponencial (49.09)	Diversas de clase pesada	1080	22
Exponencial (63.52)	Diversas de clase grande	1080	17
Exponencial (40.00)	Diversas de clase pequeña	1080	27

Cuadro 3.8 Funciones de densidad de probabilidad, que generan una demanda igual al 100% de la capacidad máxima de las pistas, para las salidas

Distribución	Tipo de aeronave	Tamaño del intervalo (minutos)	Máximo número de operaciones
Intervalo entre las 00:00 y 06:00 horas: Exponencial (2.769)	Diversas de las tres clases	360	130
Intervalo entre las 06:00 y 24:00 horas: Exponencial (37.24)	Airbus A319	1080	29
Exponencial (14.02)	Airbus A320	1080	77
Exponencial (20.00)	ATR-42	1080	54
Exponencial (8.437)	Boeing 737	1080	128
Exponencial (25.11)	Boeing 737-800	1080	43
Exponencial (33.75)	Embraer EMB-190	1080	32
Exponencial (9.152)	Embraer ERJ-145	1080	118
Exponencial (40.00)	Diversas de clase pesada	1080	27
Exponencial (45.00)	Diversas de clase grande	1080	24
Exponencial (60.00)	Diversas de clase pequeña	1080	18

En particular se consideraron diez niveles de demanda, partiendo del nivel que se presentó a principios de 2011, que corresponde en promedio al 57.2% de la capacidad máxima de las pistas, y después para demandas de 65%, 75%, 85%, 90%, 92%, 94%, 96%, 98% y 100% de la capacidad máxima de las pistas, ver detalles en el Cuadro 3.9. Observe que en este cuadro se ha desglosado la información para los dos periodos de actividad del AICM, antes y después de las 06:00 horas, tanto para aterrizajes como para despegues, y los valores totales. Para obtener cada uno de los valores de capacidad máxima en las pistas del aeropuerto, señalados en la última columna del Cuadro 3.9, se aplicaron los porcentajes de la columna cuatro al submodelo 1, y los de la octava columna al submodelo 2.

Con cada uno de los niveles de demanda fueron realizadas 10 corridas, simulando una operación de 24 horas, con la finalidad de obtener estimaciones representativas del comportamiento del aeropuerto.

Además, con base en las estimaciones anteriores y de la tendencia del crecimiento de las operaciones totales en las pistas del AICM, se determinó el año²⁴ en que iniciarán las afectaciones significativas, y cómo se deteriorará el servicio a partir de entonces.

Cuadro 3.9 Porcentaje de capacidad máxima de las pistas del AICM en función de las operaciones realizadas

Actividad entre las 00:00 y 06:00 horas				Actividad entre las 06:00 y 24:00 horas				Actividad entre las 00:00 y 24:00 horas	
Aterrizajes	Despegues	Aterrizajes y despegues	Porcentaje de la capacidad máxima	Aterrizajes	Despegues	Aterrizajes y despegues	Porcentaje de la capacidad máxima	Operaciones totales	Porcentaje de la capacidad máxima
31	17	48	13.1%	394	395	789	71.9%	837	57.2%
68	38	106	29.0%	422	424	846	77.0%	952	65.0%
116	64	180	49.2%	458	460	918	83.6%	1098	75.0%
164	90	254	69.4%	494	496	990	90.2%	1244	85.0%
189	103	292	79.8%	512	514	1026	93.4%	1318	90.0%
198	109	307	83.9%	519	521	1040	94.7%	1347	92.0%
207	114	321	87.7%	527	528	1055	96.1%	1376	94.0%
217	119	336	91.8%	534	535	1069	97.4%	1405	96.0%
227	124	351	95.9%	541	543	1084	98.7%	1435	98.0%
236	130	366	100.0%	548	550	1098	100.0%	1464	100.0%

²⁴ Aquel en donde la utilización promedio de las pistas es igual a 0.8.

III.6.2 Efectos de las labores de mantenimiento en las pistas

Con la finalidad de mantener las condiciones de máxima seguridad en las operaciones de aterrizaje y despegue, las pistas del AICM son sujetas a labores de mantenimiento periódico²⁵. Durante los últimos años este mantenimiento se ha realizado entre las 23:00 y 6:00 horas, con objeto de afectar en el menor grado la operación del aeropuerto²⁶. En consecuencia, durante algunos días el aeropuerto da servicio con una sola pista durante ese intervalo, lo que origina que su capacidad máxima disminuya.

Para este escenario se consideró que la condición durante la cual no se realizan labores de mantenimiento en las pistas, corresponde a una capacidad máxima de 61 operaciones/hora. Por otro lado, se consideró que cuando se están realizando las labores de mantenimiento en una de las pistas, se tiene una reducción en su capacidad máxima de 16%, valor en que comúnmente es afectada su operación. Esta disminución se traduce en una capacidad máxima de 51 operaciones/hora. Con fines comparativos, en un primer caso se consideró que las labores de mantenimiento se realizaron en un periodo de baja actividad (entre las 00:00 y 06:00 horas), y en un segundo caso, durante un periodo de alta actividad (entre las 06:00 y 12:00 horas). Los valores estimados fueron los tamaños máximos y promedio de las colas y los tiempos máximos y promedio de espera de las aeronaves en las pistas.

En este escenario se consideró que durante los despegues, no hubo cancelación de vuelos, y que en los aterrizajes, las aeronaves no fueron canalizadas a aeropuertos alternos. Sin embargo, es posible considerar ambos supuestos en el modelo, incrementando los valores de los tiempos promedio entre

²⁵ En general, el objetivo es restituir las características geométricas y la capacidad de frenado en las pistas.

²⁶ Comunicado de prensa No 15, del 24 de octubre de 2007, del AICM (<http://www.aicm.com.mx>).

salidas y llegadas de aeronaves, para considerar respectivamente, ambas afectaciones.

III.6.3 Efectos de la presencia de condiciones ambientales adversas

La operación del AICM puede ser afectada por condiciones ambientales adversas, como pueden ser chubascos²⁷, niebla²⁸, neblina²⁹ y ceniza volcánica³⁰. En el caso del aeropuerto de la Ciudad de México, las más comunes son las tres primeras, que afortunadamente no tienen una gran duración. Por ejemplo, los chubascos tienen comúnmente una duración de 20 a 30 minutos, y la presencia de niebla y neblina puede ser de hasta tres horas³¹. Estos tres fenómenos meteorológicos pueden reducir significativamente la visibilidad³² en el aeropuerto, por lo que en casos críticos, ante la presencia de este tipo de hidrometeoros, las operaciones aéreas se suspenden totalmente. Por lo anterior, estos meteoros generan en el caso de las salidas, demoras, y sólo en caso extremo la cancelación

²⁷ Precipitación de gotas de agua que caen desde una nube del género cumulonimbos; se caracteriza porque empieza y termina repentinamente, y por variaciones de intensidad muy bruscas. Fuente: Glosario del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), sitio en Internet <http://smn.cna.gob.mx/>.

²⁸ Es un hidrometeoro, consistente en numerosas gotitas de agua lo suficientemente pequeñas para mantenerse suspendidas en el aire por largos periodos. Fuente: Glosario del SMN, sitio en Internet <http://smn.cna.gob.mx/>.

²⁹ Suspensión en la atmósfera de gotas microscópicas de agua o de núcleos higroscópicos húmedos que reducen la visibilidad. Fuente: Glosario del SMN, sitio en Internet <http://smn.cna.gob.mx/>.

³⁰ La ceniza volcánica es una composición de fragmentos diminutos de roca y vidrio pulverizado, de diámetro menor a dos milímetros, que se forman durante una erupción volcánica. Fuente: <http://www.ucol.mx/volcan/ceniza.htm>.

³¹ Información proporcionada por controladores de tránsito aéreo, de la torre de control del AICM, en entrevista realizada el 9 de febrero de 2011.

³² Distancia horizontal máxima a la que un observador puede distinguir claramente algunos objetos de referencia en el horizonte. Algunos meteoros reducen la visibilidad, en particular la niebla reduce la visibilidad a menos de 1 kilómetro, la neblina reduce la visibilidad de 1 a 2 kilómetros, y los chubascos a 3 kilómetros o menos. Fuente: Glosario del SMN, sitio en Internet <http://smn.cna.gob.mx/>.

de vuelos. En las llegadas ocasionan que los vuelos sean desviados hacia aeropuertos alternos³³.

En cuanto a la ceniza volcánica, ésta es riesgosa particularmente cuando está formada por partículas diminutas de entre 10 y 30 μm , porque puede elevarse a gran altura, y viajar largas distancias. Cuando es lanzada lo suficientemente alto, puede alcanzar vientos superiores que pueden dispersarla a todo el mundo y entrar en las rutas de las aeronaves.

La propagación de las cenizas volcánicas depende de la dirección e intensidad de los vientos. El problema que se plantea para las aeronaves es que sus radares, a diferencia de lo que ocurre con otros fenómenos meteorológicos, no detectan la ceniza volcánica. La Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) y otras organizaciones de la aviación, reconocen la necesidad de mantener informado al sector aéreo de los riesgos de las cenizas volcánicas. Con tal fin, fueron creados nueve Centros de Asesoría de Cenizas Volcánicas en el mundo (Volcanic Ash Advisory Centers, VAAC). A nuestro país le corresponde el Centro de Asesoría de Washington, en Estados Unidos. Estos centros tienen la tarea de monitorear las nubes de ceniza volcánica en sus espacios aéreos asignados, y de emitir una alerta cuando se presentan riesgos para la actividad aérea. Una vez que un aeropuerto ha recibido el aviso de los VAAC, se ponen en marcha los protocolos que permitirán a los pilotos cambiar las trayectorias de sus aeronaves para evitar las nubes de ceniza. Si la densidad de la nube no permite rodear las zonas de peligro, se procede a cancelar los vuelos³⁴.

³³ Por ejemplo, en el caso de chubascos en el AICM, se presentaron 57 demoras, cinco desvíos de vuelos y una cancelación, durante la tarde-noche del 6 de septiembre de 2009; y en el caso de niebla, se presentaron 84 demoras y 15 desvíos de vuelos hacia aeropuertos alternos, durante la mañana del 13 de diciembre de 2010.

³⁴ Fuente: <http://www.ssd.noaa.gov/VAAC/vaac.html>.

La ceniza volcánica puede llegar a paralizar la actividad aérea debido a su potencial para dañar a las aeronaves. Los casos del volcán islandés Eyjafjöll, en 2010, y del volcán chileno Puyehue, en 2011, muestran los efectos significativos y negativos de la ceniza volcánica en el sector aéreo.

En abril de 2010, la erupción del volcán islandés Eyjafjöll provocó caos mundial en el transcurso de un mes, al obligar al mayor cierre del espacio aéreo europeo en tiempos de paz, con más de 100,000 vuelos cancelados y ocho millones de viajeros varados (<http://www.diariojornada.com.ar>, del 23 de mayo de 2011). Incluso las operaciones del AICM fueron afectadas por este evento, entre el 14 y 19 de abril de 2010 fueron canceladas 47 operaciones aéreas desde y hacia Europa, a consecuencia de la nube de cenizas que provocó la erupción del volcán de Islandia (<http://www.elfinanciero.com.mx>, del 19 de abril de 2010).

La erupción del volcán chileno de Puyehue ocurrió el 6 de junio de 2011. Del volcán emanó una columna de cenizas de casi 10 kilómetros de altura, la cual afectó inicialmente una amplia zona del sur de Argentina y Chile; provocando la cancelación de numerosos vuelos (<http://www.eluniversal.com.mx>, del 6 de junio de 2011). Días después, el 10 de junio, se incrementaron las afectaciones en Argentina y Chile, pero además se extendieron a Brasil, Uruguay y Paraguay (<http://www.aerolatinnews.com/>, del 10 de junio de 2011). Para el 12 de junio se reportó que las cenizas volcánicas habían viajado alrededor del mundo y que empezaban a afectar algunos vuelos del sur de Australia y de Nueva Zelanda (<http://www.aerolatinnews.com/>, del 12 de junio de 2011).

La ceniza volcánica presenta los siguientes riesgos para las aeronaves:

- Efecto abrasivo:* Daña las partes externas de las aeronaves, como por ejemplo, su fuselaje y pintura externa.
- Obstrucción de sensores externos:* La acumulación de ceniza puede obstruir los sensores de velocidad y altitud (tubos pitot) de las aeronaves.
- Interferencia electromagnética:* Las partículas de ceniza están cargadas eléctricamente, por lo cual generan interferencia en las comunicaciones

de radio. *Falla de los motores:* La ceniza daña los mecanismos. En particular, en los motores turbo reactores el efecto es más severo, debido al enorme flujo de aire que succionan para llevar a cabo el proceso de combustión. La ceniza volcánica muy fina es succionada hacia la cámara de combustión del motor, en donde se derrite a aproximadamente 1,100 °C, y posteriormente se funde sobre los alabes de turbina y otros componentes, que operan a una temperatura de aproximadamente 1,400 °C. Esta condición inicialmente sólo reduce el rendimiento del motor, pero si continua acumulándose ceniza, puede incluso apagarlo. En efecto, cuando hay una cantidad sustancial de ceniza dentro del motor, además de erosionar y posteriormente destruir algunos componentes, también puede atascar elementos rotativos y ocasionar lecturas erróneas de sus sensores de temperatura (Secretaría de Gobernación, 2001).

Para este escenario se consideró que se presentó un fenómeno meteorológico de niebla con duración de tres horas, entre las 02:00 y 05:00 horas, y después se supuso otro evento de niebla entre las 06:00 y 09:00 horas. En ambos casos se consideró que durante el periodo de afectación, todos los aterrizajes fueron canalizados hacia aeropuertos alternos y ninguno de los despegues se canceló. Mediante el escenario se desea saber cuánto se afecta el servicio aéreo al programar todos los despegues en espera, durante la hora posterior a la disipación del fenómeno meteorológico.

Para realizar las estimaciones, inicialmente, mediante el modelo de simulación, se obtuvo la cantidad de despegues que se generan durante tres horas de operación normal, para ambos casos. Observe que el primer caso pertenece al periodo de baja actividad del aeropuerto, por lo que se utilizó el submodelo 1, en cambio, la segunda condición corresponde al intervalo de mayor actividad aérea, por lo que fue utilizado el submodelo 2. Posteriormente, se modificaron las tasas de salida de los despegues para simular el incremento de la demanda originada por las aeronaves que no despegaron por la neblina, de

acuerdo con los valores obtenidos antes, y se determinaron los tiempos de espera y los tamaños de las líneas de espera.

III.6.4 Efecto de la aplicación de una nueva tecnología para incrementar la capacidad de las pistas

El movimiento de las aeronaves en el aire genera estelas de turbulencia originadas por el fuselaje, empenaje, tren de aterrizaje, alas y motores. De estos, los más importantes son los vórtices en las puntas de las alas y las corrientes turbulentas de gases expelidos por los motores turborreactores. Sin embargo, estas últimas son de muy corta duración, por el contrario, los torbellinos en las puntas de las alas, que son más estables, pueden mantenerse en el aire hasta por tres minutos, después de que han sido generados. Los vórtices en las puntas de las alas son el principal y más peligroso componente de las estelas de turbulencia.

En el ámbito mundial, como consecuencia de los vórtices en las puntas de las alas, desde 1972 han sido reportados accidentes en la aviación comercial y privada. Muchos de estos accidentes han tenido consecuencias fatales. Uno de estos eventos se presentó en México, el 4 de noviembre de 2008, cuando una aeronave pequeña (LearJet 45) se estrelló cerca del Paseo de la Reforma, en la Ciudad de México, antes de que dicha aeronave realizara su aproximación final a la pista 05 derecha del AICM. Durante el trayecto previo al accidente la aeronave estuvo volando atrás de una aeronave Boeing 767-300, sin guardar la distancia de separación mínima requerida de cinco millas náuticas (Comunicados de prensa de la SCT del 5 y 21 de noviembre de 2008, <http://www.sct.gob.mx/despliega-noticias/>).

Las estelas de turbulencia son especialmente peligrosas durante las fases de aterrizaje y despegue debido a tres razones. En primer lugar, durante estas fases de vuelo las aeronaves operan a relativamente bajas velocidades y con un ángulo de ataque alto. Estas condiciones maximizan la formación de los vórtices en las alas. La segunda razón se debe a que los aterrizajes y despegues, son el

momento cuando las aeronaves operan con velocidades muy cercanas a la de desplome y están muy cerca del suelo, por lo que hay muy poco margen de recuperación en el caso de encontrarse con una estela de turbulencia. La tercera razón se debe a que durante dichas fases las aeronaves están relativamente cerca y en una misma trayectoria, por lo que se incrementa el riesgo de que se encuentren con este fenómeno.

La OACI ha establecido separaciones mínimas obligatorias con base en la categoría de los vórtices generados, los cuales a su vez dependen del peso máximo de despegue de las aeronaves (ICAO, 1996).

El conocimiento del comportamiento de las estelas de los torbellinos generadas por las aeronaves, puede incrementar la capacidad de los aeropuertos con pistas paralelas muy cercanas³⁵. Después de más de cincuenta años de investigaciones en el comportamiento de estos torbellinos, el movimiento de las estelas de los torbellinos durante pequeños intervalos, es un fenómeno comprendido en profundidad. Mediante este conocimiento se han sugerido nuevos criterios para reducir los límites operacionales en los aeropuertos, con objeto de aumentar la capacidad de las pistas. Por ejemplo, ha sido examinado cómo la vieja práctica de manejar las pistas paralelas muy cercanas, como una sola pista para las aproximaciones por instrumentos, bajo ciertas condiciones, puede ser modificada con objeto de permitir un mayor número de operaciones sin afectar la seguridad (*Burnham, et al., 2001; y Vernon y Larry, 2008*). Se debe remarcar que las características de las pistas del AICM se ajustan a las de pistas paralelas muy cercanas, debido a que en este aeropuerto las pistas tienen una separación de 310 metros.

³⁵ Este término (*close-spaced parallel runways*) aplica para aquellas pistas con una separación menor a 762 metros. Fuente: *Burnham et al., 2001*.

En condiciones de calma las estelas de vórtices generalmente se debilitan y disipan en un lapso de uno a tres minutos. Sin embargo, las condiciones del estado del tiempo en las distintas alturas, y los vientos cruzados sobre las pistas pueden perturbar este comportamiento. Los estándares actuales de separación de aeronaves funcionan bien como una medida preventiva; aunque representan un costo enorme, debido a que reducen la capacidad del espacio aéreo de los aeropuertos. Con objeto de contrarrestar este inconveniente, se han desarrollado aplicaciones tecnológicas y patentes³⁶ de equipos utilizados para monitorear las estelas de turbulencia. Por ejemplo, ha sido desarrollado un sistema administrador de seguridad de las estelas de las aeronaves (AWSM, Aircraft Wake Safety Management), para la detección y predicción de las estelas de vórtices. Este sistema, desarrollado por la empresa estadounidense Fligh Safety Technologies (FST), posee un conjunto de sensores en tierra que monitorean en tiempo real el movimiento de los vórtices generados por las aeronaves. También, utiliza equipos de vigilancia a bordo de las aeronaves, información meteorológica y algoritmos de predicción. La información obtenida se utiliza para validar continuamente las predicciones del comportamiento de las estelas de vórtices en el espacio aéreo del aeropuerto. Uno de los sistemas de sensores en tierra está constituido por un conjunto de transmisores y reflectores de rayos láser, con una separación de 50 metros, que se ubican cerca de la prolongación de la línea central de las pistas. El sistema detecta los vórtices, a menudo audibles por el oído humano, al medir cómo su sonido perturba los rayos láser³⁷. Este sistema se ha estado probando en el Aeropuerto Internacional John F. Kennedy, en la base de la Fuerza Aérea de Langley, y en el Aeropuerto Internacional de Denver, en los Estados Unidos. Otro de los elementos sensores en tierra, es el radar láser o LIDAR (Light Detection and Ranging), que mide los

³⁶ Por ejemplo, la patente: Aircraft wake safety management system, con número de aplicación 11/823764, publicada el 2 de julio de 2008. Fuente: <http://www.freepatentsonline.com/y2008/0030375.html>.

³⁷ Se ha estimado que un solo rayo láser tiene la capacidad de detección equivalente a cien micrófonos convencionales.

vórtices cercanos al área donde las aeronaves tocan la pista. Las dos herramientas se complementan entre sí y ambas sirven de soporte al componente de predicción.

El sistema AWSM monitorea el espacio aéreo del área terminal del aeropuerto y, conforme predice el movimiento de los vórtices fuera del trayecto de las aeronaves, establece una condición de “luz verde”, bajo la cual los controladores de vuelo separan a las aeronaves de acuerdo con estándares de separación menores a los utilizados bajo la condición de vórtices peligrosos. En el caso de que se presenten vórtices peligrosos, el sistema establece una condición de “luz roja”, bajo la cual los controladores aplican los estándares de separación actuales que son más conservadores y, por lo tanto, disminuyen la capacidad del aeropuerto (Herrera, 2008).

Es importante aclarar que este sistema no controla la existencia de vórtices peligrosos en un aeropuerto, sólo los detecta. Por lo tanto, su implementación no implica automáticamente un incremento en la capacidad de las pistas. Este sistema sólo señala en tiempo real, cuándo es operacionalmente seguro reducir las separaciones establecidas por estela de turbulencia y cuándo se deben mantener.

Para este escenario se supone que la capacidad de las pistas del AICM se incrementa a 120 operaciones por hora, de acuerdo con las implicaciones operativas señaladas por el estudio de Vernon y Larry (2008). Ellos establecieron que bajo ciertas condiciones operativas, se puede utilizar teóricamente, una separación entre aeronaves de 30 segundos en pistas paralelas muy cercanas, lo cual se traduce en la capacidad máxima que se utilizó para este escenario.

Sin embargo, como el mismo estudio lo señala, debido a la incertidumbre de sus estimaciones y con objeto de mantener la seguridad aérea, es necesario confirmar los resultados teóricos, respaldando que no existen vórtices peligrosos

adelante de cualquier aeronave que aterriza o despegue. Para ello, se considera en este escenario que se utiliza una aplicación tecnológica, como el AWSM, señalado antes.

Utilizando la capacidad de 120 operaciones por hora, se ajustó el valor en el modelo original y se determinó bajo esta nueva condición en qué momento el AICM empieza a tener problemas de congestión, es decir, a partir de qué año la relación demanda/capacidad máxima en las pistas es mayor a 0.8 y, también, el valor del volumen de operaciones correspondiente. Además, para este escenario se modificaron las fdp originales con objeto de alcanzar una demanda igual a la capacidad máxima supuesta.

III.6.5 Efecto de la utilización intensiva de aeronaves de mayor capacidad

Para este escenario se consideró que un tipo específico de aeronave utilizada actualmente, es reemplazada por otro de mayor capacidad de pasajeros. De esta forma, se supone que se transporta la misma cantidad de pasajeros, con las nuevas aeronaves incorporadas, pero se requiere un número menor de operaciones. En las simulaciones realizadas sólo se consideró el cambio de un sólo tipo de aeronave a la vez, con el propósito de evaluar cada cambio en forma individual, sin embargo, el modelo tiene la capacidad de simular diversos cambios en forma simultánea.

Como un primer caso se consideró que todas las aerolíneas que operan aeronaves ATR 42 en el AICM, cambian su flota de aeronaves por otras del mismo fabricante, pero de mayor capacidad, en particular por aeronaves del tipo ATR 72, ver Figura 3.13. El avión comercial ATR 42 tiene capacidad para transportar entre 46 y 50 pasajeros. El modelo alargado, el ATR 72, se proyectó como un desarrollo del ATR 42 de mayor capacidad, con una planta motriz más potente, mayor capacidad de combustible y dimensiones globales incrementadas para

aumentar el número de pasajeros entre 67 y 74, dependiendo de la configuración³⁸.



Figura 3.13 Aeronave ATR 42 a la izquierda y ATR 72 a la derecha

Fuente: <http://jetphotos.net/>

Como segundo caso se consideró que todas las aeronaves pesadas, que generalmente corresponden a vuelos internacionales, son sustituidas por aeronaves del tipo Airbus A380 (Figura 3.14). Esta es la aeronave comercial más grande del mundo, con una capacidad máxima de 853 pasajeros³⁹.



Figura 3.14 Aeronave Airbus A380

Fuente: <http://jetphotos.net/>

Para el primer caso se consideró que la capacidad de las aeronaves ATR-42 es de 46 pasajeros, mientras que el de las aeronaves que se incorporaron en su lugar (ATR-72) es de 74 pasajeros. Por lo tanto, la capacidad en pasajeros de la aeronave ATR-42 es tan sólo el 62.16%, en relación con la aeronave ATR-72; esto implica que el número de operaciones requeridas para mover a un mismo

³⁸ Para mayores detalles técnicos se puede consultar el sitio del fabricante: <http://www.atraircraft.com>

³⁹ Fuente: <http://www.airbus.com/aircraftfamilies/passengeraircraft/a380family/>

número de pasajeros con las aeronaves ATR-72, es igual al 62.16% de los vuelos realizados actualmente por las aeronaves ATR 42.

Para la demanda original (enero de 2011), debido a que no hay operaciones de aeronaves ATR 42 entre las 00:00 y las 06:00 horas, no hubo cambio en las fdp, para ese intervalo. Para el intervalo entre las 06:00 y 24:00 horas se presentaron originalmente 40 aterrizajes y 39 despegues de aeronaves ATR 42, los cuales se traducen en 25 aterrizajes y 24 despegues de aeronaves ATR 72, de acuerdo con la consideración del párrafo anterior. Para reflejar este cambio, en el modelo original se reemplazaron las fdp, en los aterrizajes y despegues de las aeronaves ATR 42 (fuentes) para este intervalo, por las siguientes: 43.2 minutos/operación y 45 minutos/operación, respectivamente.

Para el segundo caso, inicialmente se determinó en cada uno de los intervalos de actividad del AICM, el número de operaciones y la cantidad de pasajeros transportados comúnmente por las aeronaves pesadas. Como resultado se obtuvo que entre las 00:00 y 06:00 horas, sólo se presentó una salida, que correspondió a una aeronave Boeing 767, con capacidad de 224 pasajeros, y seis llegadas de aeronaves (tres Boeing 767, dos Boeing 777 y un Airbus A340), que en conjunto pueden transportar 1,852 pasajeros. Para el siguiente intervalo, entre las 06:00 y 24:00 horas, se presentaron 19 salidas de aeronaves, con una capacidad conjunta de 6,432 pasajeros, y 16 llegadas de aeronaves con una capacidad para transportar 5,396 pasajeros en total. Con base en esta información, y considerando que la aeronave que sustituye a las pesadas, el Airbus A380, tiene una capacidad de 853 pasajeros, se determinó que al hacer este cambio, para el primer intervalo en las salidas no hay modificación en el número de vuelos para mantener la única operación de este tipo, y para las llegadas se requieren dos vuelos (1,852/853). Para el siguiente periodo, que es el de mayor actividad, se requieren ocho salidas (6,432/853) y seis llegadas (5,396/853).

Al reducir las llegadas y salidas de las aeronaves pesadas, con los valores señalados antes, se determinaron las nuevas fdp asociadas con la utilización del A380, las cuales se presentan a continuación.

Para las llegadas:

Durante el intervalo entre las 00:00 y 06:00 horas: Exponencial con 13.33 minutos/operación.

Durante el intervalo entre las 00:06 y 24:00 horas: Exponencial con 180 minutos/operación.

Para las salidas:

Durante el intervalo entre las 00:00 y 06:00 horas: Exponencial con 21.17 minutos/operación.

Durante el intervalo entre las 00:06 y 24:00 horas: Exponencial con 135 minutos/operación.

Estos valores fueron introducidos en el modelo original, en lugar de los valores de las aeronaves pesadas, para representar las operaciones de las aeronaves A380.

Tanto en el caso de la introducción de las aeronaves ATR 72, como del A380, se estimaron los tamaños de las colas y los tiempos de espera máximos y promedio, en las pistas.

III.6.6 Efecto de la incorporación de infraestructura nueva

Como se señaló en el planteamiento del problema (inciso I.3), en años recientes se ha incorporado nueva infraestructura al AICM, con objeto de incrementar su capacidad. Mediante este escenario se estimó el efecto de la incorporación de infraestructura adicional, en particular la incorporación y entrada en operación de nuevas posiciones de atraque para las aeronaves.

Se consideró que se incorporan nuevas posiciones de ataque en la plataforma Remota Oriente de la Terminal 2 (ver Figura 3.4). Actualmente, esta plataforma tiene seis posiciones (ver Cuadro 3.2). Para el experimento se consideró que entran en operación otras seis, para que en total esta plataforma tenga doce posiciones de ataque. Se consideró que cada una de estas posiciones tiene una capacidad promedio para atender a cada aeronave en 42.27 minutos (ver Cuadro 3.2). Con estos valores se modificó el modelo original para realizar las simulaciones. Los valores estimados fueron las demoras y los tamaños de las colas, máximos y promedio, a la entrada de las posiciones de ataque. Cada punto obtenido en ambos intervalos de actividad representa el valor promedio de diez corridas de simulación.

III.6.7 Impacto de una nueva estrategia para atender a las aeronaves durante las fases de despegue y aterrizaje

En este inciso se diseñó un escenario para estimar el impacto de la aplicación de una nueva política para atender los despegues y aterrizajes de las aeronaves, distinta a la aplicada actualmente en el ámbito mundial (FCFS), para minimizar los costos de operación de las aeronaves y las demoras de los pasajeros. Inicialmente, se realizaron 40 réplicas con el modelo de simulación original, aplicando la política actual y considerando una operación diaria de 24 horas.

Mediante estas simulaciones se obtuvieron los tiempos de entrada y salida, en las líneas de espera antes de las pistas y en las pistas mismas. También, se identificaron los distintos tipos de aeronaves y el tipo de operación realizada por cada una.

Posteriormente, fue aplicada la estrategia propuesta para atender los despegues y aterrizajes, con objeto de reducir los costos de operación de las aeronaves y las demoras de los pasajeros, de acuerdo con Herrera-García y Moreno-Quintero (2011), ver artículo completo en el Apéndice A.3. Después, se

determinaron los beneficios en términos de reducción de costos de operación y demoras. Para ello, a los valores obtenidos mediante el modelo de simulación original, se restaron los obtenidos con la estrategia propuesta.

Con objeto de aplicar la estrategia propuesta fue necesario conocer, para cada aeronave en la línea de espera, su tiempo de operación particular, el costo de operación por unidad de tiempo y el número de asientos. Todas las líneas de espera consideradas para aplicar la estrategia se formaron en un breve intervalo de menos de un minuto.

El tiempo de operación particular para cada aeronave se obtuvo utilizando la información generada por el modelo de simulación. Este tiempo es igual a la diferencia entre los tiempos de entrada y salida a las pistas. En relación con el costo de operación por unidad de tiempo (COU) y el número de asientos, los valores utilizados se muestran en el Cuadro 3.10.

Observe que los COU fueron obtenidos actualizando a 2011 los valores establecidos en 2000 por la OACI, y debido a que dicha información no incluye a todos los tipos de aeronaves que operan en el AICM, los costos de operación unitarios para las aeronaves faltantes, se obtuvieron aplicando la ecuación 3.1:

$$\text{COU} = [0.0076 \times (\text{número de asientos})] + 0.1334 \quad (3.1)$$

En donde el costo de operación unitario fue establecido en dólares/segundo. La ecuación 3.1, fue obtenida mediante la correlación lineal entre los costos de operación unitarios actualizados de la OACI y el número de asientos de las aeronaves⁴⁰. Se debe remarcar que el número de asientos es una variable significativa que puede explicar el valor de los costos de operación unitarios por unidad de tiempo, dado que mediante su análisis de regresión se obtuvo un valor p igual a 1.5361×10^{-6} .

⁴⁰ Se obtuvo un coeficiente de determinación $R^2 = 0.8176$.

Cuadro 3.10 Costos de operación por unidad de tiempo y número de asientos para los diferentes tipos de aeronaves que operan en el AICM

Aeronave	Costo de operación por unidad de tiempo ¹ (dólares/s)	Número de asientos ²
Learjet 24 ³	0.1795	6
552 Citation II ³	0.1948	8
Learjet 25 ³	0.1948	8
Learjet 35 ³	0.1948	8
Learjet 45 ³	0.2025	9
Learjet 60 ³	0.2102	10
North American NA-265 Sabreliner 40 ³	0.2179	11
Gulfstream II and III ³	0.2794	19
Swearingen SA-226TB ³	0.2794	19
De Havilland Canada DHC-6 Twin Otter	0.2948	21
IAI Arava ³	0.3178	24
Dornier 328 ³	0.3639	30
De Havilland Canada DHC-8-200 Dash	0.4331	39
CASA/IPTN CN-235 ³	0.4716	44
ATR-42	0.5149	48
Antonov AN-32 ³	0.5177	50
Bombardier CRJ100 and 200 ³	0.5177	50
Embraer ERJ-145 ³	0.5177	50
IL-18 ³	0.8252	90
Embraer EMB-190 ³	0.8867	98
Airbus 319 ³	1.1634	134
Boeing 737 ³	1.1788	136
MD-80	1.2096	155
Airbus 320	1.3319	164
Boeing 757-200	1.4037	200
Boeing 727-200	1.4545	163
Boeing 737-800 ³	1.4939	177
DC-8-72 ³	1.8245	220
Boeing 767-300	1.8489	269
Boeing 767-200 ³	1.8552	224
Airbus 300	2.3642	266
Boeing 777-200	2.4152	400
MD-11 ³	2.6163	323
Airbus 340-300 ³	2.7085	335
Airbus 340-640 ³	3.3542	419
Boeing 747	4.9528	452

Nota 1: Los costos unitarios fueron obtenidos al actualizar al 2011 los establecidos por la OACI en 2000 (ICAO, 2000). El componente relacionado con el precio de la turbosina fue actualizado utilizando el índice de precios del combustible de aviación (368.3 puntos), establecido el 11 de marzo de 2011, por la Asociación del Transporte Aéreo Internacional (IATA). Referencia: <http://www.iata.org>.

Nota 2: El número de asientos en cada aeronave puede cambiar dependiendo de la configuración de clases establecida por cada aerolínea. Los valores mostrados son cifras típicas obtenidas de los fabricantes de aeronaves.

Nota 3: Para estas aeronaves los costos unitarios se estimaron utilizando la ecuación 3.1.

CAPÍTULO 4:

IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se describen brevemente los resultados obtenidos al aplicar el modelo de simulación desarrollado a los escenarios planteados en los incisos III.6.1 a III.6.7, y se presenta su discusión respectiva. Dependiendo de la naturaleza de los resultados, estos se agruparon en cuadros y/o figuras. Observe que el orden en que se presentan los resultados, corresponde con la secuencia en que fueron planteados en el capítulo anterior.

IV.1 Escenario relacionado con el impacto originado por el crecimiento natural de la demanda de servicio

Las Figuras 4.1 y 4.2 resumen los resultados del escenario 1, la primera corresponde al periodo de menor actividad del AICM, entre las 00:00 y 06:00 horas, y la segunda al intervalo de mayor actividad, entre las 06:00 y 24:00 horas. Se observó que el periodo más problemático es entre las 06:00 y 24:00 horas, dado que en éste se presentan las mayores magnitudes de colas y demoras en las pistas, tanto en los valores promedio, como en los máximos. Mientras que en el periodo de menor actividad se alcanzan valores de 10 y 30 unidades (aeronaves o minutos) para los promedios y máximos, en el caso de mayor actividad estos valores corresponden a 18 y 47 unidades respectivamente.

Este comportamiento se debe a que en el primer intervalo, las operaciones aéreas parten de un valor más bajo, en la relación demanda/capacidad máxima; en efecto inician con un valor de 13.1%, en cambio el segundo intervalo inicia con un valor mucho más alto comparativamente, de 71.9%.

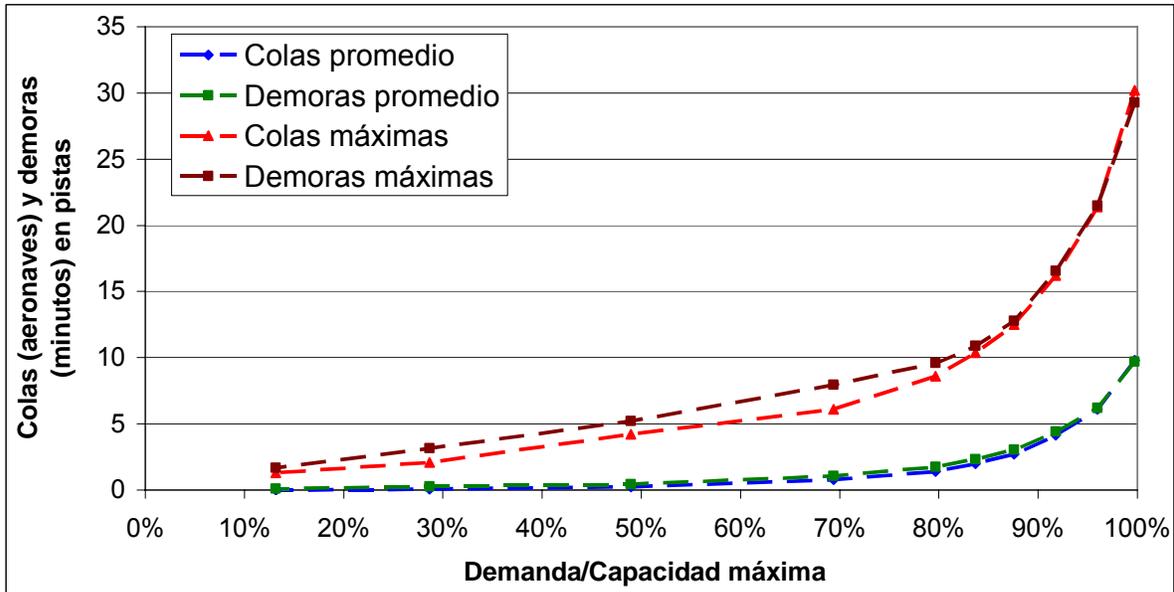


Figura 4.1 Tendencia de las colas y tiempos de espera en el AICM durante el intervalo entre las 00:00 y 06:00 horas

Nota 1: Cada punto representa el valor promedio de diez corridas de simulación.

Nota 2: Las líneas punteadas representan las tendencias.

Nota 3: La capacidad máxima está referida al intervalo de seis horas, por lo que su valor corresponde a 366 operaciones.

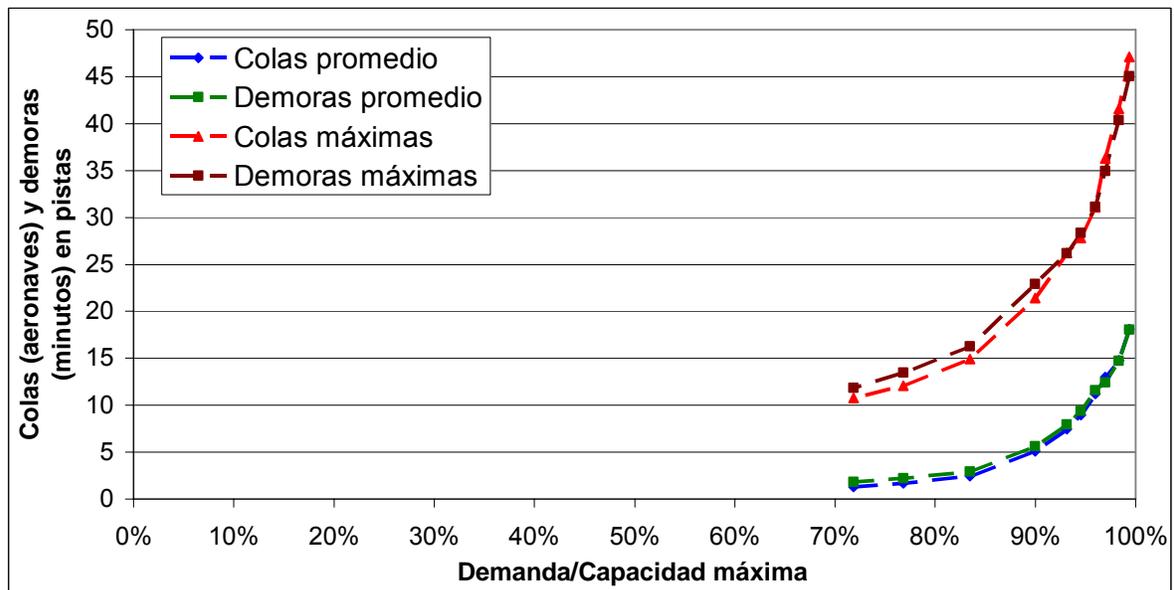


Figura 4.2 Tendencia de las colas y tiempos de espera en el AICM durante el intervalo entre las 06:00 y 24:00 horas

Nota 1: Cada punto representa el valor promedio de diez corridas de simulación.

Nota 2: Las líneas punteadas representan las tendencias.

Nota 3: La capacidad máxima está referida al intervalo de dieciocho horas, por lo que su valor corresponde a 1,098 operaciones.

Los valores de la relación demanda/capacidad máxima, señalados antes, corresponden a la situación que se presentaba en el AICM a inicios de 2011, por lo anterior, en el periodo de mayor actividad inicial, los efectos de la saturación se presentan más rápidamente y en mayor magnitud.

Para ambos periodos se observa un deterioro significativo de la operación aérea cuando la relación demanda/capacidad máxima alcanza un valor de aproximadamente 80%. Cabe señalar aquí que estas gráficas reflejan dicha relación para el intervalo correspondiente y no para el intervalo de 24 horas, la correlación con la capacidad total de las pistas para un periodo de 24 horas se presentó en el Cuadro 3.9.

También se observa que en el primer periodo de actividad, abajo del 90% de la relación demanda/capacidad máxima, en ningún caso hay demoras mayores a 15 minutos⁴¹. En cambio, en el periodo de mayor actividad, las demoras mayores a 15 minutos inician desde el 80% de la relación demanda/capacidad máxima. La causa de este comportamiento, se debe nuevamente a que el periodo de mayor actividad desde su inicio parte de un valor comparativamente más alto que el periodo de menor actividad.

Para determinar a partir de qué año iniciaría un deterioro significativo del servicio de las pistas del AICM, primero se determinó la tendencia del crecimiento de sus operaciones totales. En función del criterio considerado para el pronóstico del crecimiento, ya sea lineal o exponencial, se obtienen resultados muy distintos (Figura 4.3, líneas azul y verde respectivamente). En el caso de un crecimiento lento, la saturación del AICM iniciaría hasta el año 2023, en cambio si se presentara un crecimiento acelerado, la saturación empezaría mucho antes, a

⁴¹ En el caso de los despegues una demora mayor a 15 minutos puede originar la cancelación de los vuelos (DGAC, 2007a).

finales de 2012. Con objeto de tener un escenario moderado, se consideró para el pronóstico, que el AICM tendrá un crecimiento intermedio entre los dos anteriores (Figura 4.3, línea negra). Bajo esta condición el AICM iniciará su saturación en octubre de 2015.

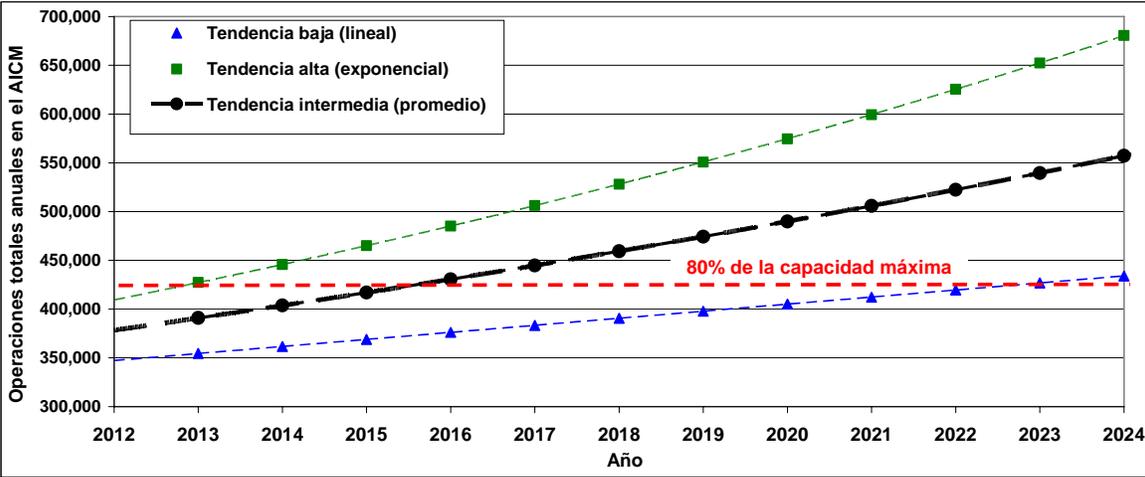


Figura 4.3 Pronóstico de las operaciones totales anuales en el AICM

Nota 1: El pronóstico de la tendencia lineal de las operaciones totales representa la tendencia baja. Se obtuvo mediante la relación: Operaciones totales = $7228.28 \times \text{Año} - 1.418 \times 10^7$, con $R^2 = 0.91$. Con base en información estadística del periodo 1967-2011 (ver Figura 3.5).

Nota 2: El pronóstico de la tendencia alta (exponencial) de las operaciones totales se obtuvo mediante la relación: Operaciones totales = $4.85 \times 10^{-32} \times e^{0.04227 \times \text{Año}}$, con $R^2 = 0.92$. Con base en información estadística del periodo 1967-2011 (ver Figura 3.5).

Nota 3: El pronóstico de la tendencia intermedia se obtuvo al promediar los valores de las tendencias baja y alta. En los tres casos señalados antes, las líneas punteadas representan las tendencias del crecimiento pronosticado. En relación con la prueba de significancia de los modelos de regresión utilizados para el pronóstico, en todos los casos se obtuvieron valores menores a 0.05 (el mayor fue de 6.4×10^{-24}), por lo que son aceptables.

Nota 4: La capacidad máxima está referida a veinticuatro horas de operación diaria anualizada, por lo que su valor corresponde a 534,360 operaciones.

Considerando la tendencia de crecimiento intermedia señalada antes, las Figuras 4.4 y 4.5 muestran cuantitativamente la evolución de la magnitud del deterioro de servicio para distintos años. Para el 80% de la capacidad máxima en el intervalo entre las 00:00 y 06:00 horas se forman líneas de espera de hasta cinco aeronaves y demoras de seis minutos; en cambio, para el intervalo entre las 06:00 y 24:00 horas las colas son de hasta dieciocho aeronaves y las demoras de veinte minutos.

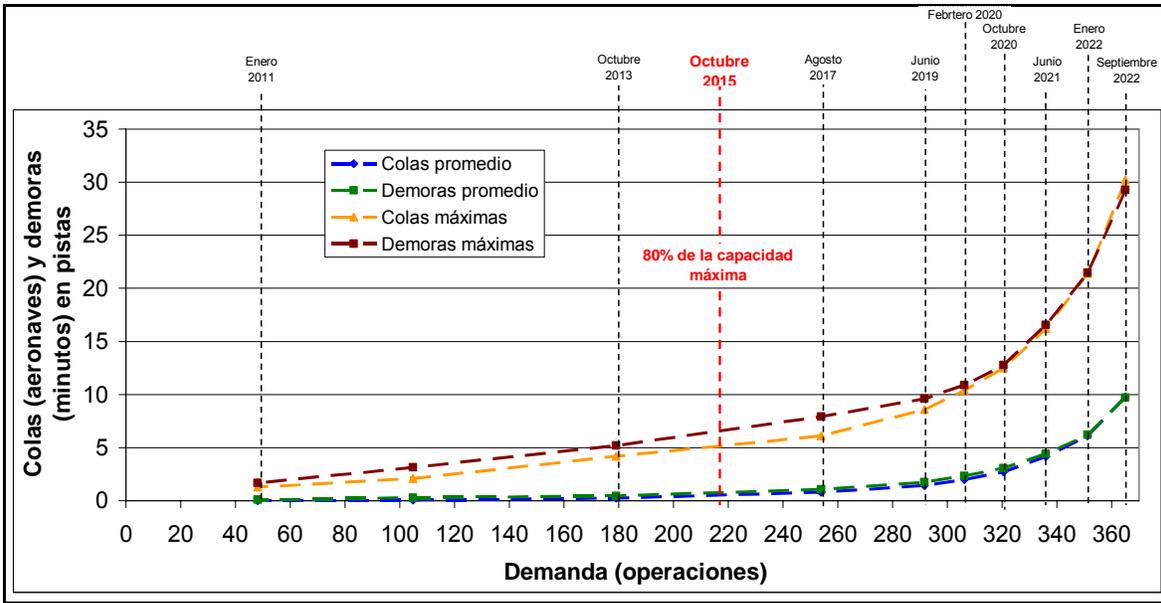


Figura 4.4 Evolución del deterioro de servicio en el AICM durante el intervalo entre las 00:00 y 06:00 horas

Nota 1: Las fechas corresponden a un crecimiento intermedio de la demanda.

Nota 2: La capacidad máxima está referida a veinticuatro horas de operación diaria, por lo que su valor corresponde a 1,464 operaciones.

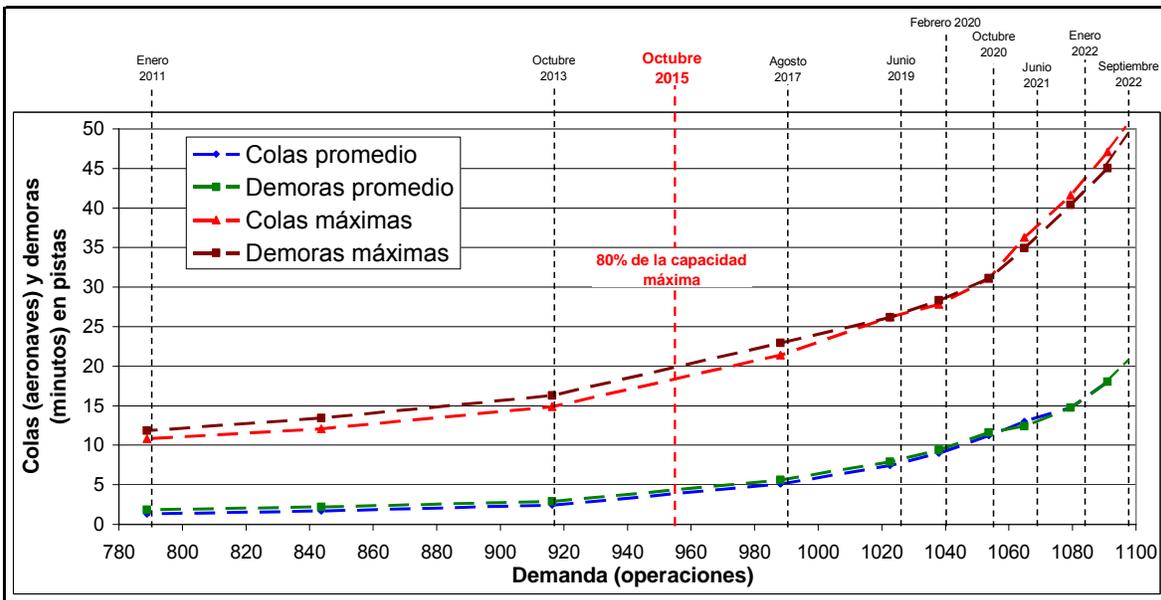


Figura 4.5 Evolución del deterioro de servicio en el AICM durante el intervalo entre las 06:00 y 24:00 horas

Nota 1: Las fechas corresponden a un crecimiento intermedio de la demanda.

Nota 2: La capacidad máxima está referida a veinticuatro horas de operación diaria, por lo que su valor corresponde a 1,464 operaciones.

En estas figuras se muestra el deterioro de servicio hasta septiembre de 2022, cuando se alcanzaría teóricamente el 100% de la capacidad de las pistas, pero con un detrimento de servicio insostenible en cualquier intervalo de operación.

Las implicaciones de los resultados anteriores van más allá de cuantificar el deterioro de servicio en las pistas del AICM, dado que como se señaló, aún considerando un crecimiento moderado de las operaciones aéreas, en octubre de 2015 se presentará un deterioro significativo del servicio, dado que se alcanzará entonces el 80% de la capacidad máxima. La cercanía de esta fecha implica que en el corto plazo deben tomarse las medidas necesarias para la construcción de un nuevo aeropuerto.

IV.2 Escenario para cuantificar los efectos de las labores de mantenimiento en las pistas

Con fines comparativos fueron contrastadas las magnitudes de las líneas de espera y de las demoras de las aeronaves en las pistas, cuando se están realizando las labores de mantenimiento, contra los valores respectivos cuando no se realizan dichas labores.

Las Figuras 4.6 y 4.7 corresponden al intervalo entre las 00:00 y 06:00 horas, en la primera se comparan los valores promedio y en la segunda los valores máximos, tanto de líneas de espera como de demoras. Cada punto representa el promedio de diez corridas de simulación y las líneas punteadas la tendencia de los valores. Se observa que para una demanda de hasta aproximadamente 255 operaciones no hay gran diferencia entre los valores promedio con y sin labores de mantenimiento, sin embargo, para demandas mayores, las colas y demoras aumentan en gran medida cuando se están realizando las labores de mantenimiento en las pistas. En el caso de los valores máximos, para demandas de 210 operaciones las demoras son del orden de 10 minutos y para demandas de 265 operaciones, las demoras alcanzan ya los 15

minutos. Para este intervalo, cuando la demanda alcanza el 100% de la capacidad de las pistas (366 operaciones en seis horas), los valores promedio se triplican y los máximos se duplican, comparando las colas y demoras sin y con mantenimiento.

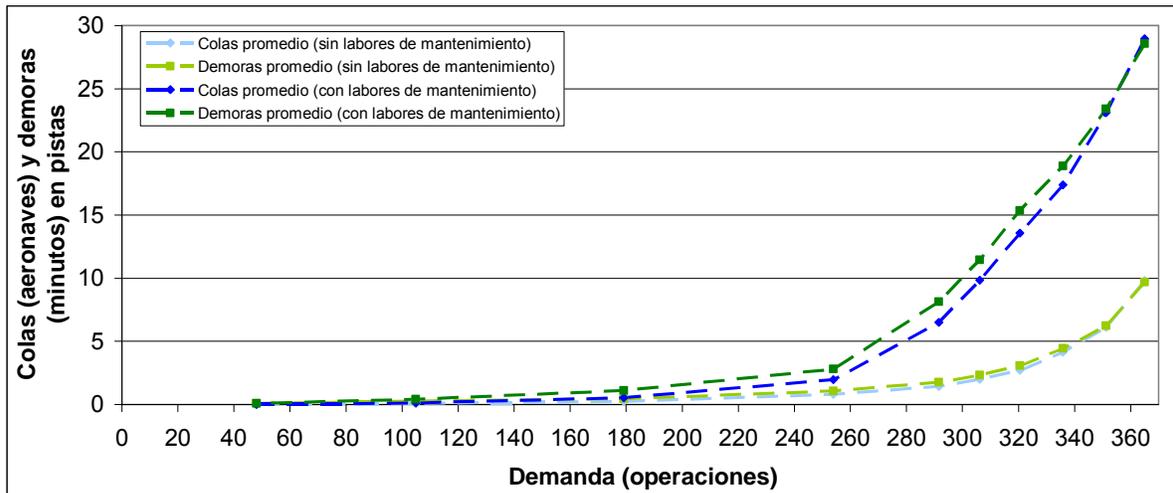


Figura 4.6 Comparativo del deterioro de servicio (colas y demoras promedio) en el AICM, derivado de las labores de mantenimiento en sus pistas, cuando se realizan durante el intervalo entre las 00:00 y 06:00 horas

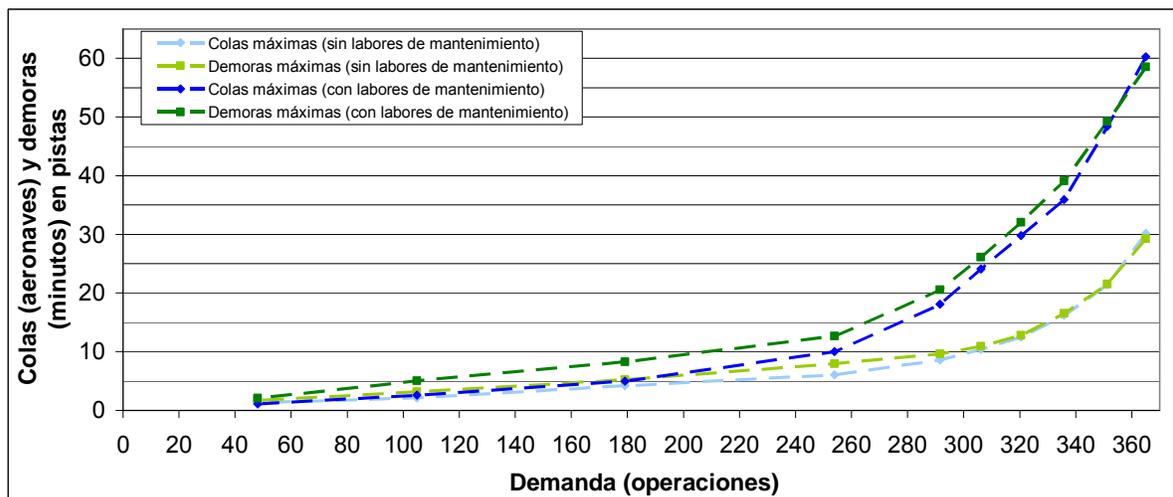


Figura 4.7 Comparativo del deterioro de servicio (colas y demoras máximas) en el AICM, derivado de las labores de mantenimiento en sus pistas, cuando se realizan durante el intervalo entre las 00:00 y 06:00 horas

Cuando las labores de mantenimiento se realizan durante las 06:00 y 24:00 horas los valores promedio, y sobre todo los máximos, empiezan a tener diferencias importantes desde su inicio (789 operaciones), ver Figura 4.8 y 4.9. En el caso de los valores promedio, las demoras de 15 minutos se generan con demandas de tan solo 880 operaciones, y para los máximos desde el inicio ya se alcanzan demoras mayores a este valor. Para este intervalo cuando se alcanza una demanda igual al 100% de la capacidad de las pistas (1,098 operaciones), los valores promedio aumentan cinco veces y los máximos se cuadruplican, comparando las colas y demoras sin y con mantenimiento.

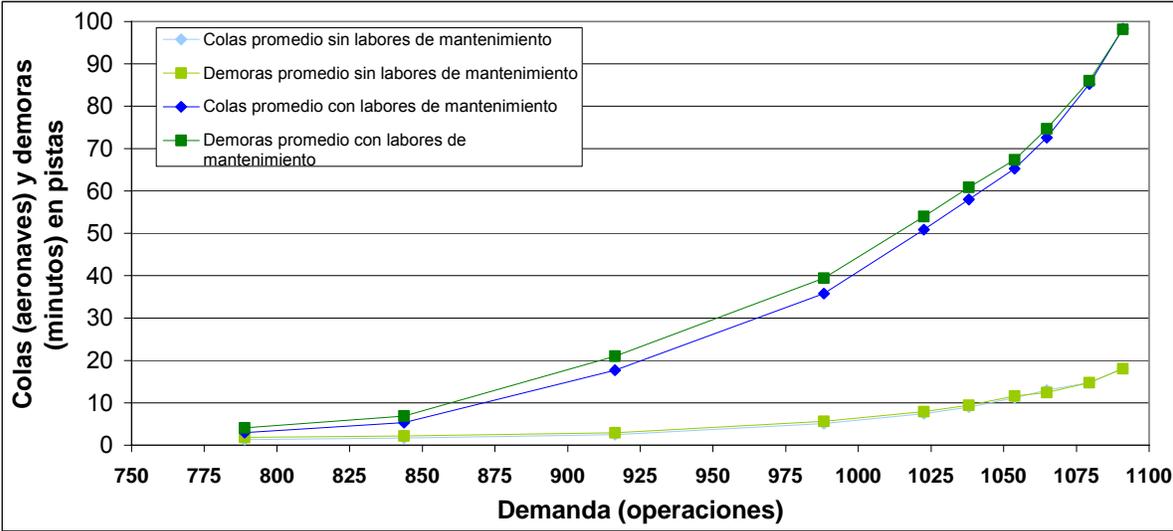


Figura 4.8 Comparativo del deterioro de servicio (colas y demoras promedio) en el AICM, derivado de las labores de mantenimiento en sus pistas, cuando se realizan durante el intervalo entre las 06:00 y 24:00 horas

Por la anterior se recomienda que bajo ninguna circunstancia se realicen labores de mantenimiento en las pistas del AICM, durante el periodo de mayor actividad, debido a que se alcanzan demoras y colas inadmisibles para las líneas aéreas y los pasajeros, aun con la demanda actual de servicio.

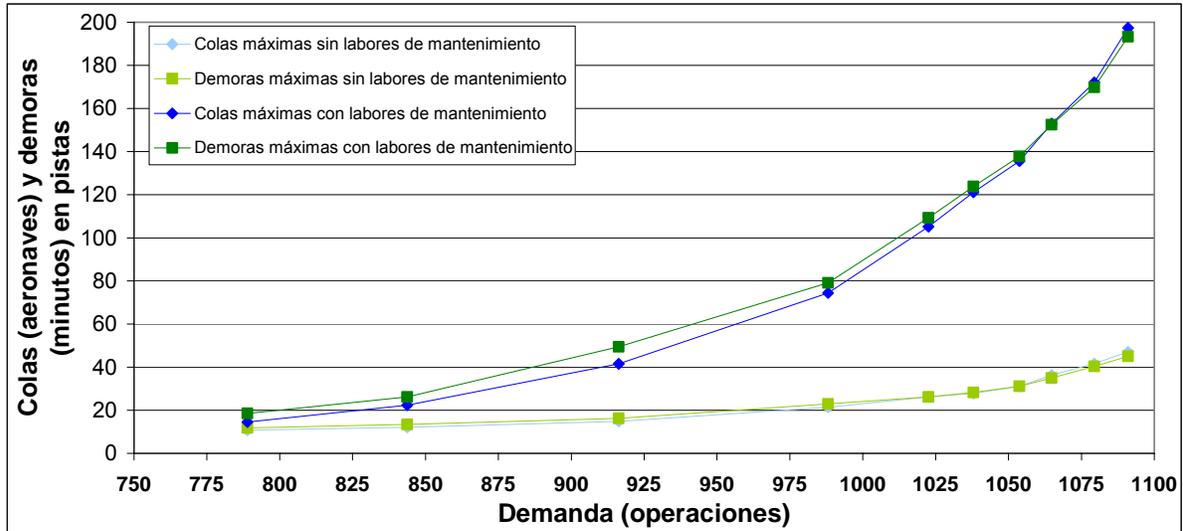


Figura 4.9 Comparativo del deterioro de servicio (colas y demoras máximas) en el AICM, derivado de las labores de mantenimiento en sus pistas, cuando se realizan durante el intervalo entre las 06:00 y 24:00 horas

El mantenimiento debe brindarse sólo entre la 00:00 y 06:00 horas, sin embargo, bajo este esquema, como se señaló antes, cuando la demanda alcance las 265 operaciones se presentarán demoras de 15 minutos, y a partir de entonces, el deterioro del servicio será cada vez mayor. De acuerdo con la tendencia de crecimiento intermedia, establecida en el inciso anterior, dicha situación se presentará en marzo de 2018. Lo anterior implica que aunado al crecimiento natural de la demanda, cuando se realicen las labores de mantenimiento en las pistas, el deterioro del servicio empeorará, aunque sólo temporalmente.

IV.3 Escenario para estimar los efectos de la presencia de condiciones ambientales adversas

Los resultados del modelo de simulación⁴², indican que si se presenta un fenómeno meteorológico de niebla que suspenda las operaciones aéreas del AICM, entre las 02:00 y 05:00 horas, serían desviados hacia aeropuertos alternos

⁴² Con base en diez corridas de simulación.

17 aterrizajes y quedarían en tierra 8 aeronaves en espera para despegar después de que se disipe la niebla, entre las 05:00 y 06:00 horas.

La demanda original considerada para el escenario (enero de 2011), en el caso de los aterrizajes no cambia, y es igual a 31 operaciones (en el intervalo de seis horas); y en el caso de los despegues es de 17 vuelos en seis horas (2.83 operaciones/hora). Así, la demanda total de despegues, considerando la demanda adicional de las aeronaves que quedaron en tierra por las condiciones ambientales adversas es igual a $2.83 + 8 = 10.83$ despegues/hora. Este valor se traduce en una fdp igual a $60/10.83 = 5.53$ minutos/aeronave, que fue el valor utilizado para modificar el submodelo 1 original.

En el Cuadro 4.1 se presenta un resumen de los resultados de diez corridas de simulación de la operación del AICM, entre los 05:00 y 06:00 horas, en donde se atiende la demanda original y la adicional derivada de las tres horas de suspensión de despegues por la niebla. Con fines comparativos, también se incluyen el resumen de los resultados de la operación de una hora normal para el intervalo entre los 05:00 y 06:00 horas.

Cuadro 4.1 Comparativo de los efectos derivados de la presencia de niebla en las pistas del AICM, durante el periodo de baja actividad.

Con la demanda adicional de despegues derivada de la presencia de niebla				
Operaciones totales	Línea de espera (aeronaves)		Demora (minutos)	
	Máxima	Promedio	Máxima	Promedio
15.6	1.300	0.026	0.742	0.094
Operación normal (sin demanda adicional)				
Operaciones totales	Línea de espera (aeronaves)		Demora (minutos)	
	Máxima	Promedio	Máxima	Promedio
8	1.000	0.004	0.169	0.022

Se observa que aunque se incrementan las demoras y los tamaños de las colas debido a que se realizan más despegues, cuando se atiende a las

aeronaves que quedaron en tierra, los valores estimados son relativamente bajos y, además es posible atender toda la demanda generada.

Por otro lado, cuando el fenómeno meteorológico se presenta entre las 06:00 y 09:00 horas, mediante el modelo de simulación se estimó⁴³ que 67 aterrizajes son desviados hacia aeropuertos alternos y que 64 aeronaves permanecen en tierra en espera para despegar, después de que se disipe la niebla, entre las 09:00 y 10:00 horas.

En este caso la demanda original considerada para el escenario (enero de 2011), en el caso de los aterrizajes se mantiene en 394 operaciones (en el intervalo de 18 horas, es decir 21.88 operaciones/hora) y en el caso de los despegues es de 395 vuelos en 18 horas (21.94 operaciones/hora). Por lo tanto, la demanda total de despegues, considerando la demanda adicional de las aeronaves que quedaron en tierra es igual a $21.94 + 64 = 85.94$ despegues/hora. Este valor se traduce en una fdp igual a $60/85.94 = 0.6981$ minutos/aeronave, que es el valor utilizado para modificar el submodelo 2 original.

En el Cuadro 4.2 se presenta un resumen de los resultados de diez corridas de simulación de la operación del AICM, entre los 09:00 y 10:00 horas, en donde se atiende la demanda original y la adicional derivada de las tres horas de suspensión de despegues por la niebla.

Cuadro 4.2 Efectos derivados de la presencia de niebla en las pistas del AICM, durante el periodo de alta actividad.

Demanda (operaciones)		Línea de espera (aeronaves)		Demora (minutos)	
Total	Atendida	Máxima	Promedio	Máxima	Promedio
108.5	61.4	47.7	24.3	26.9	13.3

⁴³ Con base en diez corridas de simulación.

En este caso se estima que se presentarían colas excesivamente largas, de casi 48 aeronaves y demoras máximas inadmisibles de 27 minutos; incluso los valores promedio son elevados. Además, no es posible procesar toda la demanda de servicio. De las cerca de 109 aeronaves que conforman la demanda total, sólo pueden ser atendidas en esa hora 61, valor que corresponde a la capacidad máxima de las pistas. Observe que la demanda de despegues es de casi 86 operaciones por hora, y la de aterrizajes es de alrededor de 22 operaciones por hora, por lo que la demanda total es de aproximadamente 108 operaciones por hora, valor muy superior a la capacidad de las pistas. Por lo anterior, aun considerando el 100% de la capacidad de las pistas, sólo se podrían atender adicionalmente a la demanda original, alrededor de 17 operaciones más⁴⁴.

Ya que en este periodo de gran actividad, durante cada hora de niebla permanecen en tierra 22 salidas de aeronaves, muchos despegues tendrán demoras o serán cancelados, dependiendo de la duración del evento climatológico.

El problema originado por este fenómeno hidrometeorológico lleva a recomendar la utilización de tecnologías que no limiten la operación de las aeronaves bajo estas condiciones. Una alternativa es la implementación de un sistema de aterrizaje por instrumentos (ILS) de mayor categoría. Desde luego esto implica un análisis costo-beneficio, en donde serían determinantes los costos de dichos equipos y el beneficio que obtendrían los usuarios (los pasajeros y las aerolíneas). Este último depende de la frecuencia con que se presentan estos fenómenos en el AICM, desafortunadamente no se tiene disponible dicha información. Sin embargo, por lo pronto, los resultados del modelo señalan que aun con la demanda actual, estos fenómenos cuando se presentan en el periodo de mayor actividad generan un decremento importante en la calidad de servicio, por lo que con el crecimiento de la demanda esta situación empeorará.

⁴⁴ Debido a que la demanda original es de 43.83 operaciones por hora y la capacidad máxima de las pistas es de 61 operaciones por hora.

El actual sistema ILS en el AICM es categoría I (SENEAM, 2011, p. AD 2-4 MMMX). Existen tres categorías de sistemas de aterrizaje por instrumentos. Para la Categoría I se requiere una visibilidad mínima de 732 metros, o de 548 metros en caso de que haya iluminación de la línea central y de las zonas de contacto de la pista. En cualquiera de los dos casos además se requiere un techo de nubes mínimo de 61 metros. La Categoría II permite aterrizar con una altura de decisión de 30 metros y una visibilidad de 366 metros. La Categoría III se subdivide en IIIa, IIIb y IIIc, en esta última se permite el aterrizaje con cero visibilidad. Cabe señalar que las Categorías II y III requieren una certificación adicional de la aeronave y de la tripulación (FAA, 2009).

Por último, se debe tener presente que el problema de la presencia de ceniza volcánica en la vecindad del AICM, tiene el potencial de presentarse durante periodos muchos mayores, que el caso de los hidrometeoros. Por lo tanto, sus efectos negativos son potencialmente mucho mayores, además como el AICM funciona como el principal centro concentrador y distribuidor de vuelos en México (hub), su cierre durante varios días podría paralizar la actividad aérea en todo el país, incluso afectaría los vuelos internacionales. Bajo esta condición la incorporación de una ILS de mayor categoría no ayudaría a resolver el problema, debido a que en el caso de la ceniza volcánica, las restricciones no provienen de la falta de visibilidad, sino de la ceniza misma (ver inciso III.6.3).

IV.4 Escenario relacionado con el efecto de la aplicación de una nueva tecnología para incrementar la capacidad de las pistas

De acuerdo con los supuestos del escenario se elaboró el Cuadro 4.3 en donde se muestran los nuevos niveles de demanda, para los dos periodos de actividad, y la demanda total del AICM, considerando que se tiene una capacidad de 120 operaciones/hora en las pistas.

Cuadro 4.3 Niveles de demanda, para los dos periodos de actividad, y la demanda total del AICM, considerando una capacidad máxima en pistas de 120 operaciones/hora

Actividad entre las 00:00 y 06:00 horas				Actividad entre las 06:00 y 24:00 horas				Actividad entre las 00:00 y 24:00 horas	
Aterrizajes	Despegues	Aterrizajes y despegues	Porcentaje de la capacidad máxima	Aterrizajes	Despegues	Aterrizajes y despegues	Porcentaje de la capacidad máxima	Operaciones totales	Porcentaje de la capacidad máxima
31	17	48	6.7%	394	395	789	36.5%	837	29.1%
220	121	341	47.4%	693	694	1,387	64.2%	1,728	60.0%
282	154	436	60.6%	789	791	1,580	73.1%	2,016	70.0%
342	188	530	73.6%	885	888	1,773	82.1%	2,303	80.0%
404	221	625	86.8%	982	985	1,967	91.1%	2,592	90.0%
416	228	644	89.4%	1,001	1,004	2,005	92.8%	2,649	92.0%
428	235	663	92.1%	1,021	1,023	2,044	94.6%	2,707	94.0%
440	242	682	94.7%	1,040	1,043	2,083	96.4%	2,765	96.0%
453	248	701	97.4%	1,059	1,062	2,121	98.2%	2,822	98.0%
465	255	720	100.0%	1,079	1,081	2,160	100.0%	2,880	100.0%

Con base en el cuadro anterior se determinaron las fdp que generan las demandas máximas, para la capacidad máxima de ambos periodos de actividad. Para el periodo entre las 00:00 y 06:00 horas estos valores fueron de 0.77419 y 1.41176 minutos/operación, y para el periodo entre las 06:00 y 24:00 fueron 1.00092 y 0.99907 minutos/operación, para los aterrizajes y despegues respectivamente. Estos valores fueron los utilizados en los dos submodelos para realizara las corridas de simulación, además ahora se consideró que la capacidad máxima de las pistas es de 120 operaciones/hora.

Para simular los distintos niveles de demanda en cada periodo de actividad (mostrados en el Cuadro 4.3), se consideró un sumidero (sink) que eliminó el exceso de demanda, de acuerdo con las proporciones señaladas en cada caso. Para cada nivel de demanda y periodo fueron realizadas diez corridas de simulación; los valores obtenidos fueron las magnitudes de las colas y las demoras en las pistas del AICM, tanto máximas como promedio. Los resultados para el primer periodo se muestran en la Figura 4.10, y para el periodo de mayor actividad en la Figura 4.11. Además en estas figuras se presentan las fechas⁴⁵ en

⁴⁵ Con base en una tendencia de crecimiento intermedia, ver inciso IV.1.

las que se alcanzarían diferentes niveles de demanda⁴⁶, remarcando el caso cuando se inicia la saturación en pistas⁴⁷, todas referidas a una operación diaria de 24 horas.

Los resultados muestran que al aplicar una nueva tecnología para incrementar la capacidad de las pistas del AICM a 120 operaciones/hora, el inicio de la saturación se prolonga hasta el año 2036, a diferencia de lo obtenido en el inciso IV.1, en donde para la capacidad actual de las pistas, éste inicia su saturación en el año 2015. Es decir, al incrementar la capacidad de las pistas con el valor señalado, se extiende el periodo operativo del AICM durante 21 años más. Además, esta saturación en el caso de la nueva capacidad, se presenta manejando casi el doble de la demanda total. En efecto, para la capacidad actual la saturación inicia con una demanda de 1,171 operaciones y, para la capacidad mayor, inicia con una demanda de 2,303 operaciones.

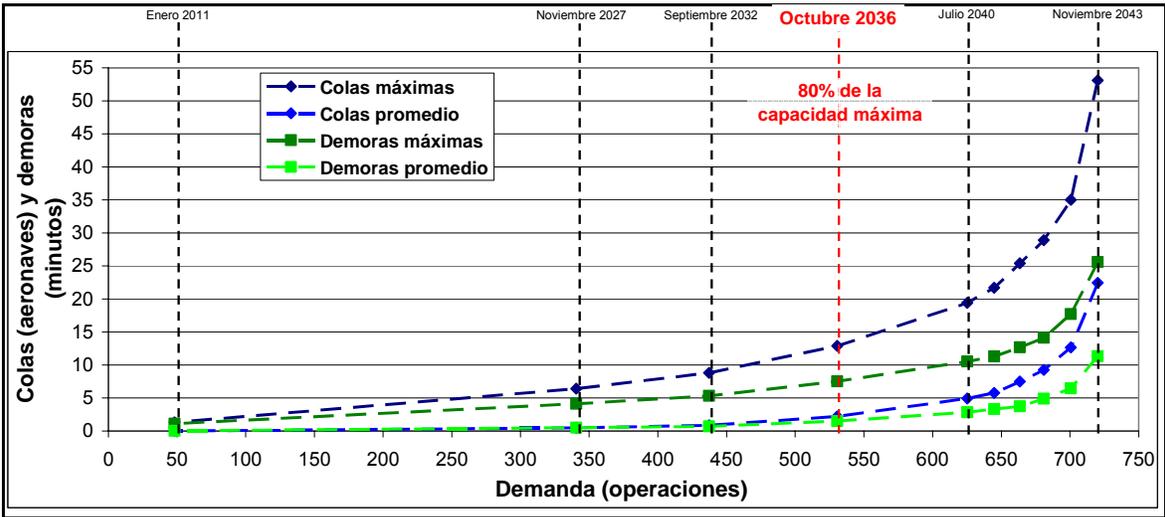


Figura 4.10 Evolución del deterioro de servicio en el AICM durante el intervalo entre las 00:00 y 06:00 horas, para una capacidad en las pistas de 120 operaciones/hora

⁴⁶ El primer nivel de demanda corresponde a los valores registrados en enero de 2011, los otros son 60%, 70%, 80%, 90% y 100% respectivamente de la capacidad máxima de las pistas, considerando una operación diaria de 24 horas.

⁴⁷ Cuando alcanzan el 80% de su capacidad máxima.

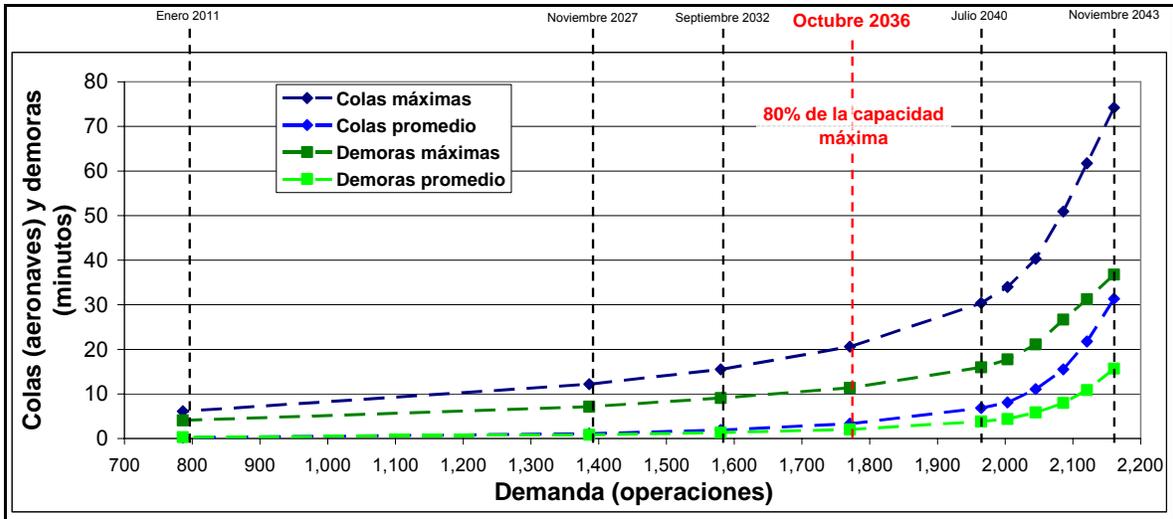


Figura 4.11 Evolución del deterioro de servicio en el AICM durante el intervalo entre las 06:00 y 24:00 horas, para una capacidad en las pistas de 120 operaciones/hora

El beneficio de incrementar la capacidad de las pistas, no sólo se presenta en el futuro de la operación del AICM, incluso con la demanda presentada en enero de 2011 se observan beneficios. Note que con la capacidad actual, en enero de 2011 se presentaban, entre la 00:00 y 06:00 horas, colas máximas de 1.3 aeronaves y demoras máximas de 1.68 minutos, y entre las 06:00 y 24:00 horas, colas máximas de 10.8 aeronaves y demoras máximas de 11.86 minutos (ver Figuras 4.4 y 4.5). Por otro lado, con la capacidad de 120 operaciones/hora se observan valores menores, sobre todo durante el periodo de mayor actividad, para el intervalo entre las 00:00 y 06:00 horas se estiman, colas máximas de 1.3 aeronaves y demoras máximas de 1.12 minutos, y entre las 06:00 y 24:00 horas, colas máximas de 6.1 aeronaves y demoras máximas de 4.08 minutos.

Como fue señalado en el capítulo anterior, la aplicación de la tecnología propuesta no controla la existencia de vórtices peligrosos, sólo los detecta, por lo que su implementación no incrementa automáticamente la capacidad de las pistas. La presencia de estos vórtices depende del tamaño de las aeronaves en operación y de las condiciones meteorológicas prevaletientes en el AICM. Por lo

anterior, y no obstante que se estiman mejoras significativas al aplicar la nueva tecnología, se debe tener presente que estas estimaciones reflejan la condición más favorable, cuando no se presentan los vórtices peligrosos.

IV.5 Escenario para estimar el efecto de la utilización intensiva de aeronaves de mayor capacidad

Los resultados para el primer caso, en donde todas las aeronaves ATR 42 son sustituidas por las ATR 72, para el intervalo entre las 06:00 y las 24:00 horas, se muestran en el Cuadro 4.4. En este mismo cuadro, con fines comparativos, también se muestran los valores obtenidos para la condición original, cuando operan las aeronaves ATR 42. Los valores en cada caso son los promedios obtenidos de diez corridas de simulación. Se debe recordar que para el intervalo entre las 00:00 y las 06:00 horas no hubo ningún cambio, debido a que en dicho periodo no hubo operaciones de aeronaves ATR 42.

Cuadro 4.4 Calidad de servicio cuando operan las aeronaves ATR 42 en la condición original; y cuando son sustituidas por las aeronaves ATR 72. Para el intervalo entre las 06:00 y las 24:00 horas.

Cuando están en operación las aeronaves ATR 42 (condición original)					
	Operaciones totales	Líneas de espera (aeronaves)		Demoras (minutos)	
		Máxima	Promedio	Máxima	Promedio
	788.90	10.80	1.32	11.86	1.82
Cuando están en operación las aeronaves ATR 72 en sustitución de las ATR 42					
	Operaciones totales	Líneas de espera (aeronaves)		Demoras (minutos)	
		Máxima	Promedio	Máxima	Promedio
	758.20	8.80	1.07	11.08	1.54
Reducción comparativa	30.70	2.00	0.25	0.78	0.28
	3.89%	18.52%	18.99%	6.57%	15.48%

En términos absolutos el principal beneficio se presenta en la reducción de los tamaños máximos de las colas, de hasta dos aeronaves. Las reducciones de las colas promedio, y de las demoras máximas y promedio, son marginales (menores a una unidad). Sin embargo, en términos relativos hay reducciones

significativas en los tamaños de las colas, máximo y promedio, de alrededor de 19%, y en las demoras la reducción es también importante para el valor promedio (15.4%), y más baja para el valor máximo (6.5%). Se debe observar cómo estos beneficios se obtienen para una reducción de la demanda de tan sólo 4%; y lo más importante, que se transporta al mismo número de pasajeros con menos operaciones aéreas.

Los resultados para el segundo caso, cuando todas las aeronaves pesadas son sustituidas por las A380, se presentan en los Cuadros 4.5 y 4.6. En forma similar al caso anterior, con fines comparativos, también se registran los valores obtenidos para la condición original, cuando operan las aeronaves pesadas.

Cuadro 4.5 Calidad de servicio cuando operan las aeronaves pesadas en la condición original; y cuando son sustituidas por las aeronaves A380. Para el intervalo entre las 00:00 y las 06:00 horas.

Cuando están en operación las aeronaves pesadas (condición original)					
	Operaciones totales	Líneas de espera (aeronaves)		Demoras (minutos)	
		Máxima	Promedio	Máxima	Promedio
	48.10	1.00	0.14	2.88	0.87
Cuando están en operación las aeronaves A380 en sustitución de las pesadas					
	Operaciones totales	Líneas de espera (aeronaves)		Demoras (minutos)	
		Máxima	Promedio	Máxima	Promedio
	44.10	1.00	0.12	2.82	0.83
Reducción comparativa	4.00	0.00	0.02	0.06	0.04
	8.32%	0.00%	11.88%	1.91%	4.06%

En este caso también se observan reducciones en los tamaños de las líneas de espera y en las demoras. Aunque en términos relativos se observan reducciones moderadas en algunos valores, por ejemplo, en las colas promedio de 11.8% para el intervalo de baja actividad, y de 12.7% para el periodo de mayor actividad; sin embargo, en términos absolutos los beneficios para los valores promedio no son significativos (en ningún caso son mayores a 0.18 unidades). En el mejor de los casos, sólo se observa una reducción de una aeronave, en las

líneas de espera máximas, para el periodo de mayor actividad. Observe que estos beneficios para el periodo de baja actividad, se obtienen con una reducción en la demanda de 8.3%, y para el de mayor actividad, los beneficios se alcanzan con tan sólo una reducción de 2.69% en la demanda. Tanto en la condición original, como cuando se utilizan las aeronaves A380, se da servicio al mismo número de pasajeros.

Cuadro 4.6 Calidad de servicio cuando operan las aeronaves pesadas en la condición original; y cuando son sustituidas por las aeronaves A380. Para el intervalo entre las 06:00 y las 24:00 horas.

Cuando están en operación las aeronaves pesadas (condición original)					
	Operaciones totales	Líneas de espera (aeronaves)		Demoras (minutos)	
		Máxima	Promedio	Máxima	Promedio
		788.90	10.80	1.32	11.86
Cuando están en operación las aeronaves A380 en sustitución de las pesadas					
	Operaciones totales	Líneas de espera (aeronaves)		Demoras (minutos)	
		Máxima	Promedio	Máxima	Promedio
		767.70	9.80	1.15	11.57
Reducción comparativa	21.20	1.00	0.17	0.29	0.18
	2.69%	9.26%	12.74%	2.44%	10.06%

Por otro lado, se debe tener presente que la utilización de aeronaves de gran capacidad, como es el caso del A380, genera impactos negativos en las terminales de pasajeros. Algunos estudios (Chiu y Walton, 2003) señalan que todos los subsistemas del lado terrestre de las terminales son afectados, dado que se incrementan los tiempos promedios de espera, sin embargo, el subsistema más afectado es el de reclamo de equipaje.

IV.6 Escenario para cuantificar el efecto de la incorporación de infraestructura nueva

En las Figuras 4.12 y 4.13 se muestra la evolución de los efectos de incorporar seis posiciones de atraque adicionales a las seis existentes, en la plataforma Remota Oriente de la Terminal 2. En estas figuras, con fines

comparativos, también se presentan los valores obtenidos para la condición original, cuando están en operación seis posiciones de atraque. Los valores en cada caso son los promedios obtenidos mediante diez corridas de simulación. Las líneas punteadas muestran las tendencias al incrementarse la demanda.

En el caso de los valores promedio se observó que el beneficio en términos relativos es reducido. Para los dos intervalos de actividad en el mejor de los casos la reducción mayor fue de 6.71% para las colas y de apenas 3.4% para las demoras. En términos absolutos el beneficio también fue muy bajo, en este caso la mayor reducción en las colas fue de 0.019 aeronaves y en las demoras de 0.058 minutos. En cambio, para los valores máximos se presentaron mayores beneficios, por ejemplo, en términos relativos para el caso de las colas máximas se estimaron reducciones de hasta 11.76% y en las demoras máximas reducciones de hasta 12.57%. En términos absolutos el beneficio estimado fue mayor que el de los valores promedio, aunque no muy alto, la mayor reducción en el tamaño de colas fue de tan solo 0.4 aeronaves y en el caso de las demoras de 0.64 minutos.

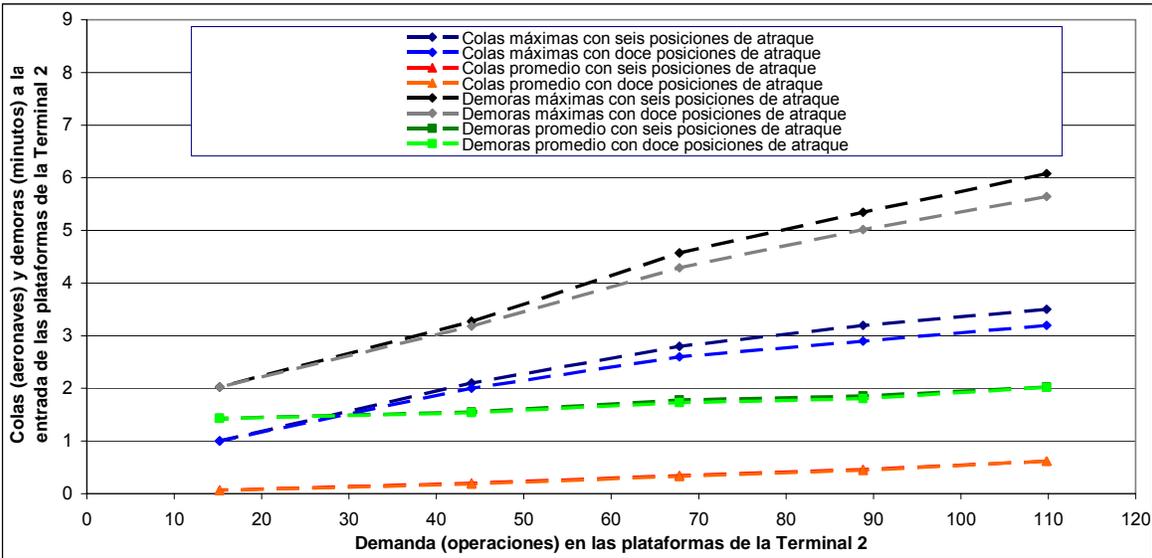


Figura 4.12 Calidad de servicio en la plataforma Remota Oriente en la condición original, con seis posiciones de atraque; y cuando se incorporan seis posiciones adicionales. Para el intervalo entre las 00:00 y las 06:00 horas.

En cuanto a las tendencias del comportamiento de la mejora en el servicio, se observó que en el intervalo entre las 00:00 y 06:00 horas, los beneficios para los valores máximos se incrementan conforme aumenta la demanda (líneas divergentes); en cambio, para el intervalo entre las 06:00 y 24:00 horas, los beneficios para los valores máximos, aunque presentan fluctuaciones, tienden a mantenerse constantes (líneas paralelas). Para los valores promedio, en colas y demoras, dado que los beneficios son marginales, las líneas de sus tendencias se sobreponen.

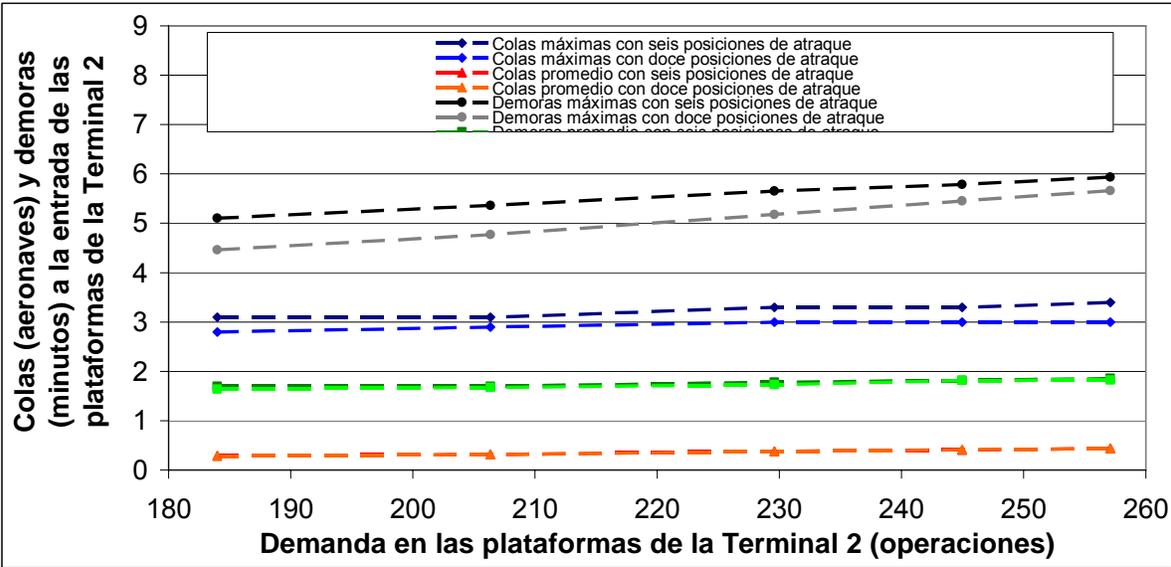


Figura 4.13 Calidad de servicio en la plataforma Remota Oriente en la condición original, con seis posiciones de atraque; y cuando se incorporan seis posiciones adicionales. Para el intervalo entre las 06:00 y las 24:00 horas.

Se debe señalar que en las figuras anteriores la demanda mínima presentada en las plataformas de la Terminal 2, corresponde a la demanda existente en enero de 2011 (15 operaciones para el primer intervalo y 185 operaciones para el segundo); y la demanda máxima considerada, corresponde a aquella que se presentaría cuando las pistas alcanzan el 100% de su capacidad máxima (111 operaciones para el primer periodo y 257 operaciones para el segundo). Debido a la diferencia de rangos en cada periodo, se podría explicar el comportamiento de las líneas de tendencia. En el primer caso éstas tienden a

converger con el cero, dado que su rango es muy cercano con éste, en cambio en el segundo periodo, ya más alejado del origen, tienden a mantenerse paralelas con el eje de las abscisas, al estar alejadas de la demanda de saturación en las plataformas.

Por otro lado, se debe remarcar que la incorporación de las seis posiciones de ataque adicionales, no generó un incremento en la cantidad de aeronaves atendidas en las pistas, debido a que la menor capacidad del sistema está precisamente en éstas.

IV.7 Escenario relacionado con el impacto de una nueva estrategia para atender a las aeronaves durante las fases de despegue y aterrizaje

Los resultados mostraron que al aplicar la estrategia propuesta se pueden obtener beneficios diarios de 4,749.17 dólares en los costos de operación y de 10,763.24 pasajeros-minuto en las demoras. También, se observó que las primeras seis horas de operación del AICM sólo contribuyen con el 0.46% de los beneficios, en relación con los costos de operación y demoras. Durante este intervalo sólo fueron observadas líneas de espera de dos aeronaves. En contraste, después de este periodo se presentaron líneas de espera de dos, tres, cuatro y cinco aeronaves: Aunque la mayoría de éstas fueron de dos aeronaves (81.04%); las líneas de espera de tres (16.94%), cuatro (1.97%) y cinco (0.04%) aeronaves contribuyeron con el 43% de los beneficios, tanto de los costos de operación como de las demoras. Además, se observó que en promedio 46.7% de las colas generadas por el modelo de simulación no produjeron beneficios cuando se aplicó la estrategia propuesta.

La afectación más crítica en la operación de aeronaves se presentó en las líneas de espera de cinco aeronaves, pero aun en este caso, la secuencia de atención, cuando se comparó con la secuencia original, se modificó en promedio

117.61 segundos; y en el caso de colas de dos aeronaves, la modificación fue de tan solo 58.61 segundos en promedio.

Si los beneficios se expresan en términos anualizados, al aplicar la estrategia propuesta es posible obtener reducciones en los costos de operación de 20.66 millones de pesos⁴⁸ (1.733 millones de dólares) y de 65,476.3 pasajeros-hora en las demoras.

Debido a la reducida actividad de las operaciones aéreas durante las primeras seis horas de operación en el AICM, se observaron muy pocas líneas de espera durante este intervalo, en promedio 1.38 líneas de espera por día y, por esta razón, solamente fueron obtenidos beneficios marginales en dicho periodo. En comparación durante el intervalo entre las 06:00 a las 24:00 horas, se presentó un promedio de 199.3 colas por día.

Durante el periodo diciembre/2010 – diciembre/2011 se realizaron 350,032 operaciones aéreas en el AICM, ubicándolo en la posición 29 en el ámbito mundial. Durante este periodo se observó que algunos aeropuertos internacionales en Estados Unidos, Europa y Asia manejaron un número similar de operaciones al del AICM. Por ejemplo, en Estados Unidos, los aeropuertos de Nueva York (LaGuardia), y Salt Lake City (Utah), manejaron prácticamente el mismo número de operaciones que el AICM ($\pm 2\%$); en Europa, el aeropuerto Leonardo da Vinci-Fiumicino, en Roma (posición 33 con 328,496 operaciones); y en Asia, los aeropuertos chinos de Hong Kong (posición 30, con 344,426 operaciones), y Shanghai-Pudong (posición 31, con 344,086 operaciones); y Yakarta en Indonesia (posición 32, con 343,152 operaciones) (Airports Council International, 2012). En todos estos casos podrían esperarse beneficios similares, a los del AICM, considerando únicamente el número de aterrizajes y despegues. Aunque los beneficios también dependen de la proporción de clases de

⁴⁸ Se consideró un tipo de cambio de 1 dólar = 11.9236 pesos, cotización del 11 de marzo de 2011.

aeronaves, por estela de turbulencia, que operan en un aeropuerto (Herrera-García y Moreno-Quintero, 2011).

Por otro lado, en un reporte relacionado con la comparación de rendimientos en centros en ruta seleccionados de Estados Unidos y Europa (Eurocontrol, 2003), hay evidencia de que los aeropuertos en estas regiones tienen una variabilidad horaria similar a la del AICM (Figura 3.7). Por esta razón, se esperaría que si la estrategia propuesta también fuera aplicada en algunos aeropuertos de Estados Unidos y Europa, durante el intervalo entre las 00:00 y 06:00 horas se presentarían beneficios reducidos y entre las 06:00 y 24:00 horas se tenderían los beneficios mayores.

Se observó que durante las primeras seis horas de operación del AICM, solamente 5.7% de las operaciones totales son generalmente realizadas, pero éstas sólo contribuyen con el 0.46% del total de los beneficios. Esto se debe a que, como se señaló en el planteamiento del problema (inciso I.3), en la operación de los sistemas de transporte las líneas de espera y demoras empiezan a presentarse cuando la demanda alcanza aproximadamente el 80% de la capacidad disponible, por lo que, cuando la demanda está abajo de este valor, las líneas de espera y demoras no se presentan o son reducidas. En el caso del AICM durante el intervalo entre las 00:00 y 06:00 horas, la demanda es muy baja (Figura 3.7), con una relación promedio demanda/capacidad igual a 13.1%.

Es posible cuantificar en términos monetarios la reducción de las demoras, si es conocido el valor del tiempo de los usuarios del aeropuerto. Una estimación de este valor para los usuarios del AICM es de 121.24 pesos/hora. El cual se obtuvo al actualizar⁴⁹ al 2010 el valor estimado por Alberro-Semerena (2008). Utilizando este valor, el beneficio anual derivado de la reducción en las

⁴⁹ Se consideró la inflación de 2009 igual a 5.3%, y la de 2010 igual a 4.16%. Fuente: Banco de México, 2011.

demoras de los pasajeros se estimó en 7.93 millones de pesos. Sin embargo, debe señalarse que el valor del tiempo de los pasajeros puede tener diferencias significativas entre diferentes regiones y países. Su valor depende principalmente de la metodología utilizada para estimarlo. Por ejemplo, para España fue propuesta la utilización de un valor del tiempo de los usuarios de sus aeropuertos igual a 16 €/hora (Fernández Candás, 2009), equivalente a aproximadamente 299.6 pesos/hora⁵⁰, el cual es un valor 2.4 veces más alto que el obtenido para el AICM. Por lo mismo, este tema abre futuras líneas de investigación.

⁵⁰ Considerando un tipo de cambio de 1 € = 18.725 pesos, cotización de diciembre de 2009.

CONCLUSIONES

En general:

Como se mostró con los siete escenarios realizados, fue posible modelar y simular los despegues y aterrizajes de aeronaves en el AICM, para mejorar la toma de decisiones y reducir los costos de operación de las aeronaves, por lo que la hipótesis de trabajo resultó verdadera.

Los resultados de las simulaciones muestran que el AICM pronto alcanzará su saturación, lo que incrementará significativamente los tamaños de las líneas de espera de las aeronaves y las demoras de los pasajeros (escenario 1). Algunas condiciones previsibles (escenario 2) y otras fortuitas (escenario 3) pueden agravar temporalmente, aunque en forma importante la operación de este aeropuerto. Afortunadamente, existen algunas alternativas que podrían aliviar en alguna medida los problemas de saturación, por ejemplo, incrementando la capacidad de las pistas, mediante nuevas tecnologías (escenario 4), reduciendo la demanda (escenario 5), incorporando nueva infraestructura (escenario 6) o mediante nuevos procedimientos operacionales, cambiando el orden de atención de las aeronaves (escenario 7). En todos estos casos fueron cuantificados los beneficios potenciales mediante el modelo de simulación desarrollado.

En cuanto a la contribución académica y al conocimiento de este trabajo, las aportaciones se centran en el algoritmo heurístico para reducir los costos de operación y las demoras de los pasajeros, que puede aplicarse a cualquier aeropuerto, y en el modelo de simulación de operaciones aéreas, que aplica exclusivamente al AICM.

Además, los principios del algoritmo heurístico pueden ser utilizados para otros objetivos, por ejemplo, para determinar la secuencia de atención de las aeronaves que aterrizan y despegan en un aeropuerto, con objeto de minimizar las

emisiones de CO₂. Es interesante señalar que en la solución de este tipo de problemas, no se puede aplicar el cálculo diferencial, debido a que las alternativas posibles son valores discretos. Esta no continuidad es la que sugirió la búsqueda de una solución mediante un algoritmo heurístico. Por otra parte, el modelo de simulación desarrollado puede aplicarse para analizar otros escenarios de interés, distintos a los que aquí se han planteado. Adicionalmente, la metodología propuesta para desarrollar el modelo puede utilizarse para el diseño de modelos de simulación de otros aeropuertos, por lo que se tiene una contribución metodológica.

En particular:

Para el escenario uno, relacionado con el impacto originado por el crecimiento natural de la demanda de servicio

Si se mantienen las tendencias de crecimiento moderado de la demanda del AICM, se espera un deterioro significativo del servicio en las pistas, a partir de octubre de 2015. Aunque ambos intervalos de actividad serán afectados, antes y después de las seis horas, es durante el segundo periodo donde se presentarán cuantitativamente las afectaciones mayores. Se estimó que a finales de 2015 habrá líneas de espera de hasta dieciocho aeronaves y demoras de veinte minutos; posteriormente a esta fecha el deterioro seguirá creciendo en forma acelerada. Lo anterior implica que la construcción de un nuevo aeropuerto se convierta en una condición importante y urgente.

Para el escenario dos, relacionado con la estimación de los efectos originados por las labores de mantenimiento en las pistas

No es recomendable realizar las labores de mantenimiento en las pistas del AICM durante el intervalo entre las 06:00 y 24:00 debido a que se generarían demoras y colas inadmisibles para su operación. El mantenimiento debe brindarse sólo entre la 00:00 y 06:00 horas, sin embargo, cuando la demanda alcance alrededor de 265 operaciones se empezarán a presentar demoras significativas, mayores a 15 minutos, y a partir de entonces, el deterioro del servicio se

incrementará. Se estima que esta situación se presentará en los primeros meses de 2018.

Para el escenario tres, relacionado con los efectos de la presencia de condiciones ambientales adversas

Los hidrometeoros que se presentan durante el intervalo entre la 00:00 y 06:00 horas tienen actualmente poco efecto en el deterioro del servicio en las pistas del AICM, las colas y demoras que generan no son significativas. Sin embargo, cuando estos fenómenos se presentan en el periodo de mayor actividad, afectan severamente la calidad del servicio, aun con los niveles de demanda actuales. Con los niveles de demanda que se presentaron a inicios de 2011, por cada hora que se suspende la operación del AICM debido a los hidrometeoros, permanecen en tierra aproximadamente 22 aeronaves sin despegar, por lo que dependiendo de la duración total de la suspensión de actividad aérea, es inevitable que se generen demoras significativas y cancelación de vuelos. Conforme se incremente la demanda natural, la calidad del servicio empeorará. La instalación de un sistema de aterrizaje por instrumentos de mayor categoría podría ayudar a reducir este problema.

Para el escenario cuatro, relacionado con los efectos de la aplicación de una nueva tecnología para incrementar la capacidad de las pistas

La aplicación de una nueva tecnología para incrementar la capacidad de las pistas a 120 operaciones/hora produciría beneficios significativos en la operación del AICM. Por un lado, el inicio de su saturación se extiende 21 años, en comparación con la capacidad actual; y por otro, se reduce el deterioro de servicio, aun con la demanda de servicio actual, principalmente durante el periodo de mayor actividad.

Para el escenario cinco, relacionado con la estimación del efecto de la utilización intensiva de aeronaves de mayor capacidad

La utilización de aeronaves de mayor capacidad que sustituyen a aeronaves más pequeñas, origina beneficios en la operación del aeropuerto al reducir los tamaños de las colas y la magnitud de las demoras. En términos relativos las reducciones en algunos casos pueden ser significativas, en los escenarios considerados de hasta 23% en las colas máximas y 15.48% en las demoras promedio; en términos absolutos los máximos beneficios observados fueron en las colas máximas, con reducciones de hasta dos aeronaves, y en las demoras máximas, con reducciones de hasta 1.68 minutos. La magnitud de los beneficios depende de la cantidad de aeronaves que dejan de realizar operaciones, por la entrada de las aeronaves de mayor capacidad, y del intervalo en donde están operando. La entrada en operación de aeronaves como el A380 debe tener en cuenta que afecta a otros subsistemas dentro de las terminales de pasajeros, por ejemplo, al de reclamo de equipaje.

Para el escenario seis, relacionado con la medición del efecto de incorporar infraestructura nueva

Se observó que en caso de incorporar infraestructura nueva, en particular seis posiciones de atraque adicionales a las seis existentes en la plataforma Remota Oriente que ofrece servicio a la Terminal 2, se obtendrían beneficios marginales en el caso de las colas y demoras promedio a la entrada de las plataformas. En cambio para las colas y demoras máximas, en términos relativos, habría reducciones de hasta aproximadamente 12%, en términos absolutos la mayor reducción en las colas sería de 0.4 aeronaves y en el caso de las demoras de 0.64 minutos.

Para el escenario siete, relacionado con el impacto de una nueva estrategia para atender a las aeronaves durante las fases de despegue y aterrizaje

Mediante el modelo de simulación se estimó que si la estrategia propuesta es aplicada, es posible obtener beneficios significativos en el AICM. Se estimaron beneficios anuales del orden de 20.66 millones de pesos ahorrados en costos de operación de las aeronaves y de 65,476.3 pasajeros-hora en reducción

de demoras. Integrando ambos resultados en términos monetarios se obtiene un beneficio anual de aproximadamente 28.6 millones de pesos. Observe que estos beneficios podrían ser alcanzados sin afectar en gran medida la operación aérea, generalmente la modificación de la secuencia de atención sólo cambió el inicio de los servicios en aproximadamente un minuto y, en los casos más críticos, alrededor de dos minutos. Los resultados señalados antes, son una referencia de los beneficios potenciales que podrían ser alcanzados por algunos aeropuertos de Estados Unidos, Europa y Asia, debido a que algunas características operacionales del AICM son similares a las de estos aeropuertos. Sin embargo, las proporciones de las clases de aeronaves, clasificadas por estela de turbulencia en cada aeropuerto y el valor del tiempo de los pasajeros en cada país, podrían cambiar significativamente los resultados; el primero, en los beneficios relacionados con los costos de operación; y el segundo, en la cuantificación monetaria de las demoras. Además de la reducción de los costos de operación y de las demoras, hay otro beneficio importante que no fue estimado, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Partiendo del modelo de simulación establecido aquí, es posible cuantificar en un futuro trabajo de investigación estos beneficios ambientales.

Por último, se debe señalar que aquellas condiciones que generan beneficios en la operación del aeropuerto, escenarios 4, 5, 6 y 7, aunque fueron considerados en forma independiente, existe la posibilidad de aplicarlos en forma conjunta, dado que son complementarios. Con lo que finalmente se podría obtener una mayor eficiencia de las instalaciones aeroportuarias, en beneficio de los pasajeros y las aerolíneas.

LITERATURA CITADA

- Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA). 1996. Sistema Estadístico Aeroportuario, XII edición. P. 197. México.
- Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA). 2006. ASA: Aeropuertos para la competitividad y el desarrollo. Fondo de Cultura Económica. México.
- Airports Council International, Worldwide Airport Traffic Statistics, 2012. March, 2012. Canada.
- Alberro-Semerena, J. 2008. Costo de oportunidad social del tiempo de usuarios del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México. El Trimestre Económico. Vol. LXXV (1), núm. 297, enero-marzo. México.
- Averill M. Law. 2011. ExpertFit Version 8, User's Guide. Averill M. Law & Associates, Inc. USA.
- Banks Jerry, Carson John S, and Nelson Barry L. 1996. Discrete-Event System Simulation, 2nd ed., Prentice-Hall. USA.
- Banco de México. 1983. Informe Anual 1982. México.
- Banco de México. 1995. Informe Anual 1994. México.
- Banco de México. 2009. Informe Anual 2008. México.
- Banco de México. 2011. Informe Anual 2010. México.
- Barnhart Cynthia, Fearing Douglas, Odoni Amedeo and Vaze Vikrant. 2012. Demand and capacity management in air transportation. EURO Journal of Transportation and Logistics. Vol. 1/2012. Disponible en: <http://www.springerlink.com/content/m282w6q4031203rv/fulltext.pdf>
- Burnham, D.C; Hallock, J.N; Greene, G.C. 2001. Increasing airport capacity with modified IFR approach procedures for close-spaced parallel runways. Air Traffic Control Quarterly (2001), Vol. 9, No. 1, pp. 45-58. Published by: Air Traffic Control Association Institute, Inc. USA.
- Chiu Chiung-Yu and 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.

- de Neufville Richard and Odoni Amedeo R. 2003. Airport Systems. Planning, Design and Management. McGraw-Hill. ISBN-13: 978-0-07-138477-3. USA.
- Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC). 2000. La Aviación Mexicana en Cifras 1993-1999. P. 125. México.
- Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC). 2007. Circular Obligatoria CO AV-01/04-R1. Proceso para el establecimiento de operaciones en el espacio aéreo mexicano con separación vertical mínima reducida (RVSM). México.
- Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC). 2007a. La Aviación Mexicana en Cifras 1989-2006. México.
- Eurocontrol. 2003. A comparison of performance in selected US and European en-route centres. Belgium.
- Evans, M., Hastings, N. and Peacock, B. 2000. Statistical distributions. 3rd Edition. Wiley Series in Probability and Statistics. Canada.
- Federal Aviation Administration (FAA). 2009. Procedures for the Evaluation and Approval of Facilities for Special Authorization Category I Operations and All Category II and III Operations Air Traffic Control. U.S. Department of Transportation. USA.
- Federal Aviation Administration (FAA). 2010. Air Traffic Control. JO 7110.65T. U.S. Department of Transportation. Effective Date: February 11, 2010. USA.
- Fernández Candás, R. 2009. Optimización de la asignación de aeronaves a puertas de embarque en aeropuertos considerando el tiempo de rodadura. Universidad Politécnica de Cataluña. Abertis. España.
- Flexsim Software Products. 2010. Flexsim Simulation Software User Guide. Version 5. USA.
- Galíndez López Demetrio, Solorio Aguirre Antonio, Ocampo Cornejo Miguel Ángel y Arellano Bolio María de Lourdes. 2007. Aeropuertos Modernos: Ingeniería y Certificación. Instituto Politécnico Nacional. México.
- Hamzawi Salah G. 1992. Lack of airport capacity: Exploration of alternative solutions. Transportation Research: An International Journal Part A: Policy and Practice No. 1. Pergamon Press. New York. USA.
- Henrisken, James O. 1983. The Integrated Simulation Environment, Operations Research, Vol. 31, No. 6, November-December 1983. U.S.A.

- Herabat, P and McNeil, S. 2004. Impact of reduced vertical separation minimum implementation on airport system infrastructures. Journal of Transportation Engineering. Volume 130. Issue Number 6. American Society of Civil Engineers. USA.
- Herrera García Alfonso. 2001. Simulación de operaciones aeroportuarias. El caso de despegues y aterrizajes en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México. Publicación Técnica No. 180, Instituto Mexicano del Transporte. México.
- Herrera García Alfonso. 2006. Alternativas de solución para problemas de capacidad aeroportuaria. Publicación Técnica No. 284, Instituto Mexicano del Transporte. México.
- Herrera García Alfonso. 2008. Innovaciones en la tecnología aeroportuaria. Publicación Técnica No. 317, Instituto Mexicano del Transporte. México.
- Herrera-García, A. and Moreno-Quintero, E. (2011). Strategy for attending takeoffs and landings to reduce the aircraft operating costs and the passenger delays. European Journal of Transport and Infrastructure Research. Volume 11. Issue 2. April 2011, pp. 219-233. Netherlands. Disponible en: http://www.ejtir.tbm.tudelft.nl/issues/2011_02/pdf/2011_02_05.pdf
- Hillier, F.S. and Lieberman, G.J. 2006. Introduction to Operations Research. McGraw Hill, 8th edition. USA.
- ICAO. 1996. Procedures for Air Navigation Services. Rules of the Air and Air Traffic Services (PANS-RAC). Doc. 4444-RAC/501. Part V, Section 16 and Part VI, Section 7. Canada.
- ICAO. 2000. ALLPIRG/4-WP/28 Appendix. Summer 2000. Disponible en: www.icao.int/icao/en/ro/allpirg/allpirg4/wp28app.pdf
- Kazda Antonín and Caves Robert E. 2000. Airport Design and Operation. Pergamon. Elsevier Science Ltd. ISBN: 0080428134. Netherlands.
- Law Averill M and Kelton W David. 2006. Simulation Modeling and Analysis, Second Edition, McRaw-Hill, Inc. USA.
- Lee, M H. 2002. Developing annual airport use information with simulation modeling data. Transportation Research E-Circular. Transportation Research Board. USA.
- Martínez Antonio, J.J. et al. 2011. Manual Estadístico del Sector Transporte 2011. Instituto Mexicano del Transporte. México.

- Nombela Gustavo. 2009. Modelos de capacidad de infraestructura de transporte. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Ministerio de Fomento. Gobierno de España. España.
- Odoni A and Vittek J. 1976. Airport quotas and peak hour pricing: Theory and practice. Flight Transportation Laboratory, Massachusetts Institute of Technology. Cambridge, Massachusetts. USA.
- Rodríguez Torres Federico y Delgado Altamirano Ricardo. 1991. Técnicas y Modelos de Simulación de Sistemas, Instituto Politécnico Nacional, septiembre de 1991. México.
- Santana, ESM and Muller, C. 2003. An analysis of delay and travel times at Sao Paulo International Airport (AISP/GRU): Planning based on simulation model. University of Nebraska, Omaha. USA.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. 2008. Programa Sectorial de Comunicaciones y Transportes 2007-2012. México.
- Secretaría de Gobernación. 2001. Las Cenizas Volcánicas del Popocatepetl y sus Efectos para la Aeronavegación e Infraestructura Aeroportuaria. Centro Nacional de Prevención de Desastres. Universidad Autónoma de México. Instituto de Geofísica. México.
- Servicios a la Navegación en el Espacio Aéreo Mexicano (SENEAM). 2011. Publicación de Información Aeronáutica (PIA). Enmienda 01/11 (379). México.
- SIMPROCESS. 2011. SIMPROCESS Distributions on line. Disponible en: http://www.simprocess.com/products/webhelp/SPHelp/simprocess_distributions.html
- Swain James J. 2011. Simulation Software Survey. OR/MS Today. Vol. 38, No. 5, October. USA. Disponible en: <http://www.orms-today.org/surveys/Simulation/Simulation.html>
- Trani, Antonio and Baik, Hojong. 2002. VTASIM: A new paradigm to model airport operations. Transportation Research E-Circular. Transportation Research Board. USA.
- Upton, G., and Cook, I. 2002. A Dictionary of Statistics. Oxford Paperback. Oxford University Press. USA.

- Vernon J. Rossow and Larry A. Meyn. 2008. Guidelines for Avoiding Vortex Wakes During Use of Closely-Spaced Parallel Runways. NASA Ames Research Center, Moffett Field, CA 94035. USA.
- Wu, Cheng-Lung. 2003. The influence of operational uncertainties on airline schedule planning and punctuality control issues. University of Nebraska, Omaha. USA.
- Wu, Cheng-Lung. 2004. An investigation of operational uncertainties in airline schedules and the implication on schedule design and reliability. 10th World Conference on Transport Research. Turkey.
- Wu, Cheng-Lung and Caves, R E. 2004. Modelling and simulation of aircraft turnaround operations at airports. Transportation Planning and Technology. Volume 27. Issue Number 1. Taylor & Francis Limited. United Kingdom.

APÉNDICE

**Apéndice A.1. AEROPUERTOS MÁS IMPORTANTES DEL MUNDO POR PASAJEROS
TRANSPORTADOS, MOVIMIENTOS REALIZADOS (OPERACIONES DE ATERRIZAJE Y
DESPEGUE EN PISTAS) Y CARGA MOVILIZADA (DICIEMBRE 2010-DICIEMBRE 2011)**

POSICIÓN	AEROPUERTO	PASAJEROS	AEROPUERTO	MOVIMIENTOS	AEROPUERTO	CARGA (TONELADAS)
1	ATLANTA, GA	92,365,860	ATLANTA, GA	923,991	HONG KONG, CN	3,968,397
2	BEIJING, CN	77,403,668	CHICAGO, IL	875,798	MEMPHIS, TN	3,918,535
3	LONDON, GB	69,433,565	DALLAS/FT WORTH, TX	646,803	SHANGHAI, CN (PVG)	3,103,030
4	CHICAGO, IL	66,561,023	DENVER, CO	628,784	ANCHORAGE, AK	2,625,201
5	TOKYO, JP	62,263,025	LOS ANGELES, CA	603,912	SEOUL, INCHEON, KR	2,539,222
6	LOS ANGELES, CA	61,848,449	CHARLOTTE, NC	539,842	DUBAI, AE	2,269,768
7	PARIS, FR	60,970,551	BEIJING, CN	533,253	FRANKFURT, DE	2,215,181
8	DALLAS/FT WORTH, TX	57,806,152	LAS VEGAS, NV	531,538	LOUISVILLE, KY	2,187,766
9	FRANKFURT, DE	56,426,255	HOUSTON, TX	528,725	PARIS, FR	2,095,773
10	HONG KONG, CN	53,314,213	PARIS, FR	514,059	TOKYO NARITA, JP	1,945,110
11	DENVER, CO	52,699,298	FRANKFURT, DE	487,162	SINGAPORE, SG	1,898,850
12	JAKARTA, ID	52,446,618	LONDON, GB	480,931	MIAMI, FL	1,840,231
13	DUBAI, AE	50,977,960	PHOENIX, AZ	461,989	LOS ANGELES, CA	1,688,351
14	AMSTERDAM, NL	49,754,910	PHILADELPHIA, PA	448,129	BEIJING, CN	1,668,751
15	MADRID, ES	49,644,302	DETROIT, MI	443,028	TAIPEI, TW	1,627,461
16	BANGKOK, TH	47,910,744	AMSTERDAM, NL	437,074	AMSTERDAM, NL	1,549,686
17	NEW YORK, NY (JFK)	47,854,283	MINNEAPOLIS/ST PAUL, MN	434,401	LONDON, GB	1,509,450
18	SINGAPORE, SG	46,543,845	MADRID, ES	429,381	CHICAGO, IL	1,506,117
19	LAS VEGAS, NV	41,479,572	TORONTO, ON	428,312	NEW YORK, NY (JFK)	1,351,259
20	SHANGHAI, CN (PVG)	41,450,211	MUNICH, DE	409,956	BANGKOK, TH	1,321,842
21	SAN FRANCISCO, CA	40,907,389	NEW YORK, NY (JFK)	407,783	INDIANAPOLIS, IN	907,594
22	PHOENIX, AZ	40,565,677	NEWARK, NJ	405,763	TOKYO, JP	873,016
23	HOUSTON, TX	40,170,844	SAN FRANCISCO, CA	403,564	SHENZHEN, CN	826,022
24	CHARLOTTE, NC	39,043,708	MIAMI, FL	394,572	NEWARK, NJ	807,202
25	MIAMI, FL	38,314,389	TOKYO, JP	378,914	LEIZPIG, DR	743,981
26	MUNICH, DE	37,763,701	BOSTON, MA	368,709	OSAKA, JP	742,976
27	KUALA LUMPUR, MY	37,670,586	SALT LAKE CITY, UT	357,314	COLOGNE, DE	726,259
28	ROME, IT	37,651,222	NEW YORK, NY (LGA)	352,007	KUALA LUMPUR, MY	702,116
29	ISTANBUL, TR	37,398,221	MEXICO CITY, MX	350,032	MUMBAI, IN	681,266
30	SYDNEY, AU	36,022,614	HONG KONG, CN	344,426	LIEGE, BE	674,360
31	ORLANDO, FL	35,356,991	SHANGHAI, CN (PVG)	344,086	LUXEMBOURG, LU	656,931
32	SEOUL, INCHEON, KR	35,191,825	JAKARTA, ID	343,152	ATLANTA, GA	651,771
33	NEW DELHI, IN	34,729,467	ROME, IT	328,496	BOGOTA	606,414
34	BARCELONA, ES	34,387,597	DUBAI, AE	326,342	NEW DELHI, IN	594,085
35	LONDON, GB	33,668,048	ISTANBUL, TR	325,164	DALLAS/FT WORTH, TX	594,084
36	NEWARK, NJ	33,577,154	PHOENIX, AZ	317,443	ISTANBUL, TR	513,933
37	TORONTO, ON	33,434,199	SEATTLE/TACOMA, WA	314,947	JAKARTA, ID	508,321
38	SHANGHAI, CN (SHA)	33,112,442	MEMPHIS, TN	311,791	OAKLAND, CA	499,365
39	MINNEAPOLIS/ST PAUL, MN	33,074,443	LONG BEACH, CA	311,575	TORONTO, ON	489,654
40	SEATTLE/TACOMA, WA	32,820,060	NEW DELHI, IN	311,045	ABU DHABI, EA	487,951
41	DETROIT, MI	32,419,181	ORLANDO, FL	309,876	CINCINNATI, OH	487,185
42	PHILADELPHIA, PA	30,839,130	SYDNEY, AU	307,375	CHENGDU, CN	477,696
43	MUMBAI, IN	30,439,122	SINGAPORE, SG	306,301	SAO PAULO, BR	476,910
44	SAO PAULO, BR	30,371,131	BANGKOK, TH	305,097	SHANGHAI, CN (SHA)	454,089
45	MANILA, PH	29,551,394	BOGOTA	304,330	MILAN, IT	450,447
46	CHENGDU, CN	29,073,990	BARCELONA, ES	303,047	OUSTON, TX	444,137
47	BOSTON, MA	28,866,313	LOS ANGELES, CA	299,779	BRUSSELS, BE	430,496
48	SHENZHEN, CN	28,245,745	VANCOUVER, BC	293,852	MADRID, ES	422,168
49	MELBOURNE, AU	28,060,111	BALTIMORE, MD	276,361	PHILADELPHIA, PA	415,288
50	TOKYO NARITA, JP	28,055,722	ANCHORAGE, AK	272,583	MEXICO CITY, MX	414,951
52	MEXICO CITY, MX	26,368,861				

Fuente: Airports Council International, 2011.

Apéndice A.2. DOCUMENTACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN DEL AICM

PISTA 05R

Connections

Input Port 1 : COLA ATERRIZAJES Output Port 1
Input Port 2 : Queue620 Output Port 1
Output Port 1 : Queue13 Input Port 1
Output Port 2 : Queue633 Input Port 1
Center Port 1 : PISTA 05L Center Port 1

PISTA 05L

Connections

Input Port 1 : Queue617 Output Port 1
Input Port 2 : COLA ATERRIZAJES Output Port 2
Output Port 1 : RODAJE ECO147 Input Port 1
Output Port 2 : Sink608 Input Port 2
Center Port 1 : PISTA 05R Center Port 1
Center Port 2 : PISTA 05R28 Center Port 1
Center Port 3 : PISTA 05R29 Center Port 1
Center Port 4 : RODAJE ECO Center Port 1
Center Port 5 : RODAJE FOX Center Port 1
Center Port 6 : RODAJE BRAVO Center Port 1
Center Port 7 : RODAJE GOLFO Center Port 1

ATERRIZAJES A319

Connections

No input connections
Output Port 1 : COLA ATERRIZAJES Input Port 1
Output Port 2 : AJUSTE ATERRIZAJES Input Port 1
No center connections

COLA ATERRIZAJES

Connections

Input Port 1 : ATERRIZAJES A319 Output Port 1
Input Port 2 : ATERRIZAJES A320 Output Port 1
Input Port 3 : ATERRIZAJES ATR 42 Output Port 1
Input Port 4 : ATERRIZAJES B737 Output Port 1
Input Port 5 : ATERRIZAJES B737_800 Output Port 1
Input Port 6 : ATERRIZAJES EMBRAER EMB_190 Output Port 1
Input Port 7 : ATERRIZAJES EMBRAER ERJ_145 Output Port 1
Input Port 8 : ATERRIZAJES HEAVY Output Port 1
Input Port 9 : ATERRIZAJES LARGE Output Port 1
Input Port 10 : ATERRIZAJES SMALL Output Port 1
Output Port 1 : PISTA 05R Input Port 1
Output Port 2 : PISTA 05L Input Port 2
Center Port 1 : Queue620 Center Port 1
Center Port 2 : Queue617 Center Port 2
Center Port 3 : Queue633 Center Port 1

PISTA 05R13

Connections

No input connections
No output connections
No center connections

Queue13

Connections

Input Port 1 : PISTA 05R Output Port 1
Output Port 1 : RODAJE ECO Input Port 1
Output Port 2 : PISTA 05R28 Input Port 1
Output Port 3 : PISTA 05R29 Input Port 1
No center connections

RODAJE ECO

Connections

Input Port 1 : Queue13 Output Port 1
Output Port 1 : RODAJE ECO147 Input Port 2
Center Port 1 : PISTA 05L Center Port 4

RODAJE FOX

Connections

Input Port 1 : PISTA 05R28 Output Port 2
Output Port 1 : RODAJE ECO148 Input Port 1
Center Port 1 : PISTA 05L Center Port 5

RODAJE BRAVO**Connections**

Input Port 1 : PISTA 05R29 Output Port 1
Output Port 1 : RODAJE ECO148 Input Port 2
Center Port 1 : PISTA 05L Center Port 6

RODAJE GOLFO**Connections**

Input Port 1 : PISTA 05R28 Output Port 1
Output Port 1 : Queue568 Input Port 1
Center Port 1 : PISTA 05L Center Port 7

PISTA 05L26**Connections**

No input connections
No output connections
No center connections

PISTA 05L27**Connections**

No input connections
No output connections
No center connections

PISTA 05R28**Connections**

Input Port 1 : Queue13 Output Port 2
Output Port 1 : RODAJE GOLFO Input Port 1
Output Port 2 : RODAJE FOX Input Port 1
Center Port 1 : PISTA 05L Center Port 2

PISTA 05R29**Connections**

Input Port 1 : Queue13 Output Port 3
Output Port 1 : RODAJE BRAVO Input Port 1
Center Port 1 : PISTA 05L Center Port 3

PISTA 05R34**Connections**

No input connections
No output connections
No center connections

RODAJE ALPHA 05R**Connections**

No input connections
No output connections
No center connections

RODAJE ALPHA**Connections**

No input connections
No output connections
No center connections

RODAJE ALPHA 05L**Connections**

No input connections
No output connections
No center connections

RODAJE B cabecera**Connections**

No input connections
No output connections
No center connections

plataforma 47**Connections**

Input Port 1 : Queue TI Output Port 57
Output Port 1 : Sink643 Input Port 57
No center connections

plataforma 46A**Connections**

Input Port 1 : Queue TI Output Port 56
Output Port 1 : Sink643 Input Port 56
No center connections

plataforma 46**Connections**

Input Port 1 : Queue TI Output Port 55

Output Port 1 : Sink643 Input Port 55
No center connections

plataforma 45

Connections

Input Port 1 : Queue TI Output Port 54
Output Port 1 : Sink643 Input Port 54
No center connections

plataforma 44

Connections

Input Port 1 : Queue TI Output Port 53
Output Port 1 : Sink643 Input Port 53
No center connections

plataforma 43

Connections

Input Port 1 : Queue TI Output Port 52
Output Port 1 : Sink643 Input Port 52
No center connections

plataforma 42

Connections

Input Port 1 : Queue TI Output Port 51
Output Port 1 : Sink643 Input Port 51
No center connections

plataforma 41A

Connections

Input Port 1 : Queue TI Output Port 50
Output Port 1 : Sink643 Input Port 50
No center connections

plataforma 41

Connections

Input Port 1 : Queue TI Output Port 49
Output Port 1 : Sink643 Input Port 49
No center connections

plataforma S6

Connections

Input Port 1 : Queue TI Output Port 4
Output Port 1 : Sink643 Input Port 4
No center connections

plataforma S5

Connections

Input Port 1 : Queue TI Output Port 3
Output Port 1 : Sink643 Input Port 3
No center connections

plataforma S4

Connections

Input Port 1 : Queue TI Output Port 2
Output Port 1 : Sink643 Input Port 2
No center connections

plataforma 1

Connections

Input Port 1 : Queue TI Output Port 7
Output Port 1 : Sink643 Input Port 7
No center connections

plataforma S8

Connections

Input Port 1 : Queue TI Output Port 6
Output Port 1 : Sink643 Input Port 6
No center connections

plataforma S3

Connections

Input Port 1 : Queue TI Output Port 1
Output Port 1 : Sink643 Input Port 1
No center connections

plataforma 2

Connections

Input Port 1 : Queue TI Output Port 8
Output Port 1 : Sink643 Input Port 8
No center connections

plataforma 3

Connections

Input Port 1 : Queue TI Output Port 9

Output Port 1 : Sink643 Input Port 9

No center connections

plataforma 4

Connections

Input Port 1 : Queue TI Output Port 10 Output Port 1 : Sink643 Input Port 10

No center connections

plataforma 5

Connections

Input Port 1 : Queue TI Output Port 11

Output Port 1 : Sink643 Input Port 11

No center connections

plataforma 6

Connections

Input Port 1 : Queue TI Output Port 12

Output Port 1 : Sink643 Input Port 12

No center connections

plataforma 8

Connections

Input Port 1 : Queue TI Output Port 13

Output Port 1 : Sink643 Input Port 13

No center connections

plataforma 9

Connections

Input Port 1 : Queue TI Output Port 14

Output Port 1 : Sink643 Input Port 14

No center connections

plataforma 10

Connections

Input Port 1 : Queue TI Output Port 15

Output Port 1 : Sink643 Input Port 15

No center connections

plataforma 11

Connections

Input Port 1 : Queue TI Output Port 16

Output Port 1 : Sink643 Input Port 16

No center connections

plataforma 12

Connections

Input Port 1 : Queue TI Output Port 17

Output Port 1 : Sink643 Input Port 17

No center connections

plataforma 13

Connections

Input Port 1 : Queue TI Output Port 18

Output Port 1 : Sink643 Input Port 18

No center connections

plataforma 15

Connections

Input Port 1 : Queue TI Output Port 19

Output Port 1 : Sink643 Input Port 19

No center connections

plataforma 16

Connections

Input Port 1 : Queue TI Output Port 20

Output Port 1 : Sink643 Input Port 20

No center connections

plataforma 17

Connections

Input Port 1 : Queue TI Output Port 21

Output Port 1 : Sink643 Input Port 21

No center connections

plataforma 18

Connections

Input Port 1 : Queue TI Output Port 22

Output Port 1 : Sink643 Input Port 22
No center connections

plataforma S7

Connections

Input Port 1 : Queue TI Output Port 5
Output Port 1 : Sink643 Input Port 5
No center connections

plataforma 20

Connections

Input Port 1 : Queue TI Output Port 23
Output Port 1 : Sink643 Input Port 23
No center connections

plataforma 21

Connections

Input Port 1 : Queue TI Output Port 24
Output Port 1 : Sink643 Input Port 24
No center connections

plataforma 22

Connections

Input Port 1 : Queue TI Output Port 25
Output Port 1 : Sink643 Input Port 25
No center connections

plataforma 23

Connections

Input Port 1 : Queue TI Output Port 26
Output Port 1 : Sink643 Input Port 26
No center connections

plataforma 24

Connections

Input Port 1 : Queue TI Output Port 27
Output Port 1 : Sink643 Input Port 27
No center connections

plataforma 25

Connections

Input Port 1 : Queue TI Output Port 28
Output Port 1 : Sink643 Input Port 28
No center connections

plataforma 26

Connections

Input Port 1 : Queue TI Output Port 29
Output Port 1 : Sink643 Input Port 29
No center connections

plataforma 27

Connections

Input Port 1 : Queue TI Output Port 30
Output Port 1 : Sink643 Input Port 30
No center connections

plataforma 28

Connections

Input Port 1 : Queue TI Output Port 31
Output Port 1 : Sink643 Input Port 31
No center connections

plataforma 29

Connections

Input Port 1 : Queue TI Output Port 32
Output Port 1 : Sink643 Input Port 32
No center connections

plataforma 30

Connections

Input Port 1 : Queue TI Output Port 33
Output Port 1 : Sink643 Input Port 33
No center connections

plataforma 31

Connections

Input Port 1 : Queue TI Output Port 34
Output Port 1 : Sink643 Input Port 34
No center connections

plataforma 31A

Connections

Input Port 1 : Queue TI Output Port 35

Output Port 1 : Sink643 Input Port 35

No center connections

plataforma 32

Connections

Input Port 1 : Queue TI Output Port 36

Output Port 1 : Sink643 Input Port 36

No center connections

plataforma 33

Connections

Input Port 1 : Queue TI Output Port 37

Output Port 1 : Sink643 Input Port 37

No center connections

plataforma 33A

Connections

Input Port 1 : Queue TI Output Port 38

Output Port 1 : Sink643 Input Port 38

No center connections

plataforma 34

Connections

Input Port 1 : Queue TI Output Port 39

Output Port 1 : Sink643 Input Port 39

No center connections

plataforma 35

Connections

Input Port 1 : Queue TI Output Port 40

Output Port 1 : Sink643 Input Port 40

No center connections

plataforma 35A

Connections

Input Port 1 : Queue TI Output Port 41

Output Port 1 : Sink643 Input Port 41

No center connections

plataforma 36

Connections

Input Port 1 : Queue TI Output Port 42

Output Port 1 : Sink643 Input Port 42

No center connections

plataforma 37

Connections

Input Port 1 : Queue TI Output Port 43

Output Port 1 : Sink643 Input Port 44

No center connections

plataforma 37A

Connections

Input Port 1 : Queue TI Output Port 44

Output Port 1 : Sink643 Input Port 43

No center connections

plataforma 38

Connections

Input Port 1 : Queue TI Output Port 45

Output Port 1 : Sink643 Input Port 45

No center connections

plataforma 39

Connections

Input Port 1 : Queue TI Output Port 46

Output Port 1 : Sink643 Input Port 48

No center connections

plataforma 39A

Connections

Input Port 1 : Queue TI Output Port 47

Output Port 1 : Sink643 Input Port 47

No center connections

plataforma 40

Connections

Input Port 1 : Queue TI Output Port 48

Output Port 1 : Sink643 Input Port 46
No center connections

plataforma 51

Connections

Input Port 1 : Queue568 Output Port 6
Output Port 1 : Queue609 Input Port 1
No center connections

plataforma 50A

Connections

Input Port 1 : Queue568 Output Port 5
Output Port 1 : Queue609 Input Port 2
No center connections

plataforma 49

Connections

Input Port 1 : Queue568 Output Port 3
Output Port 1 : Queue609 Input Port 4
No center connections

plataforma 48A

Connections

Input Port 1 : Queue568 Output Port 2
Output Port 1 : Queue609 Input Port 5
No center connections

plataforma 48

Connections

Input Port 1 : Queue568 Output Port 1
Output Port 1 : Queue609 Input Port 6
No center connections

plataforma 52

Connections

Input Port 1 : Queue568 Output Port 7
Output Port 1 : Queue614 Input Port 6
No center connections

plataforma 52A

Connections

Input Port 1 : Queue568 Output Port 8
Output Port 1 : Queue614 Input Port 5
No center connections

plataforma 53

Connections

Input Port 1 : Queue568 Output Port 9
Output Port 1 : Queue614 Input Port 4
No center connections

plataforma 54

Connections

Input Port 1 : Queue568 Output Port 10
Output Port 1 : Queue614 Input Port 3
No center connections

plataforma 55

Connections

Input Port 1 : Queue568 Output Port 11
Output Port 1 : Queue614 Input Port 2
No center connections

plataforma 55A

Connections

Input Port 1 : Queue568 Output Port 12
Output Port 1 : Queue614 Input Port 1
No center connections

plataforma 56

Connections

Input Port 1 : Queue568 Output Port 13
Output Port 1 : Queue615 Input Port 1
No center connections

plataforma 57

Connections

Input Port 1 : Queue568 Output Port 14
Output Port 1 : Queue615 Input Port 2
No center connections

plataforma 57A

Connections

Input Port 1 : Queue568 Output Port 15 Output Port 1 : Queue615 Input Port 3
No center connections

plataforma 58

Connections

Input Port 1 : Queue568 Output Port 16
Output Port 1 : Queue615 Input Port 4
No center connections

plataforma 58A

Connections

Input Port 1 : Queue568 Output Port 17
Output Port 1 : Queue615 Input Port 5
No center connections

plataforma 59

Connections

Input Port 1 : Queue568 Output Port 18
Output Port 1 : Queue615 Input Port 6
No center connections

plataforma 60

Connections

Input Port 1 : Queue568 Output Port 19 Output Port 1 : Queue615 Input Port 7
No center connections

plataforma 61

Connections

Input Port 1 : Queue568 Output Port 20
Output Port 1 : Queue615 Input Port 8
No center connections

plataforma 62

Connections

Input Port 1 : Queue568 Output Port 21
Output Port 1 : Queue615 Input Port 9
No center connections

plataforma 63

Connections

Input Port 1 : Queue568 Output Port 22
Output Port 1 : Queue615 Input Port 10
No center connections

plataforma 64

Connections

Input Port 1 : Queue568 Output Port 23
Output Port 1 : Queue615 Input Port 11
No center connections

plataforma 65

Connections

Input Port 1 : Queue568 Output Port 24
Output Port 1 : Queue615 Input Port 12
No center connections

plataforma 66

Connections

Input Port 1 : Queue568 Output Port 25
Output Port 1 : Queue615 Input Port 13
No center connections

plataforma 67

Connections

Input Port 1 : Queue568 Output Port 26
Output Port 1 : Queue615 Input Port 14
No center connections

plataforma 68

Connections

Input Port 1 : Queue568 Output Port 27
Output Port 1 : Sink646 Input Port 5
Output Port 2 : Sink645 Input Port 5
No center connections

plataforma 69

Connections

Input Port 1 : Queue568 Output Port 28

Output Port 1 : Queue616 Input Port 13
No center connections

plataforma 70

Connections

Input Port 1 : Queue568 Output Port 29
Output Port 1 : Queue616 Input Port 12
No center connections

plataforma 71

Connections

Input Port 1 : Queue568 Output Port 30
Output Port 1 : Queue616 Input Port 11
No center connections

plataforma 72

Connections

Input Port 1 : Queue568 Output Port 31
Output Port 1 : Queue616 Input Port 10
No center connections

plataforma 73

Connections

Input Port 1 : Queue568 Output Port 32
Output Port 1 : Queue616 Input Port 9
No center connections

plataforma 74

Connections

Input Port 1 : Queue568 Output Port 33
Output Port 1 : Queue616 Input Port 8
No center connections

plataforma 75

Connections

Input Port 1 : Queue568 Output Port 34
Output Port 1 : Queue616 Input Port 1
No center connections

plataforma 76

Connections

Input Port 1 : Queue568 Output Port 35
Output Port 1 : Queue616 Input Port 2
No center connections

plataforma 77

Connections

Input Port 1 : Queue568 Output Port 36
Output Port 1 : Queue616 Input Port 3
No center connections

plataforma 78

Connections

Input Port 1 : Queue568 Output Port 37
Output Port 1 : Queue616 Input Port 4
No center connections

plataforma 79

Connections

Input Port 1 : Queue568 Output Port 38
Output Port 1 : Queue616 Input Port 5
No center connections

plataforma 80

Connections

Input Port 1 : Queue568 Output Port 39
Output Port 1 : Queue616 Input Port 6
No center connections

plataforma 81

Connections

Input Port 1 : Queue568 Output Port 40
Output Port 1 : Queue616 Input Port 7
No center connections

plataforma T1

Connections

Input Port 1 : Queue568 Output Port 41
Output Port 1 : Queue610 Input Port 11
No center connections

plataforma T2

Connections Input Port 1 : Queue568 Output Port 42

Output Port 1 : Queue610 Input Port 10

No center connections

plataforma T3

Connections

Input Port 1 : Queue568 Output Port 43

Output Port 1 : Queue610 Input Port 9

No center connections

plataforma T4

Connections

Input Port 1 : Queue568 Output Port 44

Output Port 1 : Queue610 Input Port 8

No center connections

plataforma T5

Connections

Input Port 1 : Queue568 Output Port 45

Output Port 1 : Queue610 Input Port 7

No center connections

plataforma T6

Connections

Input Port 1 : Queue568 Output Port 46

Output Port 1 : Queue610 Input Port 6

No center connections

plataforma T7

Connections

Input Port 1 : Queue568 Output Port 47

Output Port 1 : Queue610 Input Port 5

No center connections

plataforma T8

Connections

Input Port 1 : Queue568 Output Port 48

Output Port 1 : Queue610 Input Port 4

No center connections

plataforma T9

Connections

Input Port 1 : Queue568 Output Port 49

Output Port 1 : Queue610 Input Port 3

No center connections

plataforma TA

Connections

Input Port 1 : Queue568 Output Port 50

Output Port 1 : Queue610 Input Port 2

No center connections

plataforma TB

Connections

Input Port 1 : Queue568 Output Port 51

Output Port 1 : Queue610 Input Port 1

No center connections

RODAJE ECO147

Connections

Input Port 1 : PISTA 05L Output Port 1

Input Port 2 : RODAJE ECO Output Port 1

Output Port 1 : RODAJE BRAVO149 Input Port 1

No center connections

RODAJE ECO148

Connections

Input Port 1 : RODAJE FOX Output Port 1

Input Port 2 : RODAJE BRAVO Output Port 1

Output Port 1 : RODAJE BRAVO149 Input Port 2

No center connections

RODAJE BRAVO149

Connections

Input Port 1 : RODAJE ECO147 Output Port 1

Input Port 2 : RODAJE ECO148 Output Port 1

Output Port 1 : Queue TI Input Port 1

No center connections

Queue T1

Connections

Input Port 1 : RODAJE BRAVO149 Output Port 1
Output Port 1 : plataforma S3 Input Port 1
Output Port 2 : plataforma S4 Input Port 1
Output Port 3 : plataforma S5 Input Port 1
Output Port 4 : plataforma S6 Input Port 1
Output Port 5 : plataforma S7 Input Port 1
Output Port 6 : plataforma S8 Input Port 1
Output Port 7 : plataforma 1 Input Port 1
Output Port 8 : plataforma 2 Input Port 1
Output Port 9 : plataforma 3 Input Port 1
Output Port 10 : plataforma 4 Input Port 1
Output Port 11 : plataforma 5 Input Port 1
Output Port 12 : plataforma 6 Input Port 1
Output Port 13 : plataforma 8 Input Port 1
Output Port 14 : plataforma 9 Input Port 1
Output Port 15 : plataforma 10 Input Port 1
Output Port 16 : plataforma 11 Input Port 1
Output Port 17 : plataforma 12 Input Port 1
Output Port 18 : plataforma 13 Input Port 1
Output Port 19 : plataforma 15 Input Port 1
Output Port 20 : plataforma 16 Input Port 1
Output Port 21 : plataforma 17 Input Port 1
Output Port 22 : plataforma 18 Input Port 1
Output Port 23 : plataforma 20 Input Port 1
Output Port 24 : plataforma 21 Input Port 1
Output Port 25 : plataforma 22 Input Port 1
Output Port 26 : plataforma 23 Input Port 1
Output Port 27 : plataforma 24 Input Port 1
Output Port 28 : plataforma 25 Input Port 1
Output Port 29 : plataforma 26 Input Port 1
Output Port 30 : plataforma 27 Input Port 1
Output Port 31 : plataforma 28 Input Port 1
Output Port 32 : plataforma 29 Input Port 1
Output Port 33 : plataforma 30 Input Port 1
Output Port 34 : plataforma 31 Input Port 1
Output Port 35 : plataforma 31A Input Port 1
Output Port 36 : plataforma 32 Input Port 1
Output Port 37 : plataforma 33 Input Port 1
Output Port 38 : plataforma 33A Input Port 1
Output Port 39 : plataforma 34 Input Port 1
Output Port 40 : plataforma 35 Input Port 1
Output Port 41 : plataforma 35A Input Port 1
Output Port 42 : plataforma 36 Input Port 1
Output Port 43 : plataforma 37 Input Port 1
Output Port 44 : plataforma 37A Input Port 1
Output Port 45 : plataforma 38 Input Port 1
Output Port 46 : plataforma 39 Input Port 1
Output Port 47 : plataforma 39A Input Port 1
Output Port 48 : plataforma 40 Input Port 1
Output Port 49 : plataforma 41 Input Port 1
Output Port 50 : plataforma 41A Input Port 1
Output Port 51 : plataforma 42 Input Port 1
Output Port 52 : plataforma 43 Input Port 1
Output Port 53 : plataforma 44 Input Port 1
Output Port 54 : plataforma 45 Input Port 1
Output Port 55 : plataforma 46 Input Port 1
Output Port 56 : plataforma 46A Input Port 1
Output Port 57 : plataforma 47 Input Port 1

No center connections

plataforma 50

Connections

Input Port 1 : Queue568 Output Port 4
Output Port 1 : Queue609 Input Port 3
No center connections

Queue568

Connections

Input Port 1 : RODAJE GOLFO Output Port 1
Output Port 1 : plataforma 48 Input Port 1

Output Port 2 : plataforma 48A Input Port 1
Output Port 3 : plataforma 49 Input Port 1
Output Port 4 : plataforma 50 Input Port 1
Output Port 5 : plataforma 50A Input Port 1
Output Port 6 : plataforma 51 Input Port 1
Output Port 7 : plataforma 52 Input Port 1
Output Port 8 : plataforma 52A Input Port 1
Output Port 9 : plataforma 53 Input Port 1
Output Port 10 : plataforma 54 Input Port 1
Output Port 11 : plataforma 55 Input Port 1
Output Port 12 : plataforma 55A Input Port 1
Output Port 13 : plataforma 56 Input Port 1
Output Port 14 : plataforma 57 Input Port 1
Output Port 15 : plataforma 57A Input Port 1
Output Port 16 : plataforma 58 Input Port 1
Output Port 17 : plataforma 58A Input Port 1
Output Port 18 : plataforma 59 Input Port 1
Output Port 19 : plataforma 60 Input Port 1
Output Port 20 : plataforma 61 Input Port 1
Output Port 21 : plataforma 62 Input Port 1
Output Port 22 : plataforma 63 Input Port 1
Output Port 23 : plataforma 64 Input Port 1
Output Port 24 : plataforma 65 Input Port 1
Output Port 25 : plataforma 66 Input Port 1
Output Port 26 : plataforma 67 Input Port 1
Output Port 27 : plataforma 68 Input Port 1
Output Port 28 : plataforma 69 Input Port 1
Output Port 29 : plataforma 70 Input Port 1
Output Port 30 : plataforma 71 Input Port 1
Output Port 31 : plataforma 72 Input Port 1
Output Port 32 : plataforma 73 Input Port 1
Output Port 33 : plataforma 74 Input Port 1
Output Port 34 : plataforma 75 Input Port 1
Output Port 35 : plataforma 76 Input Port 1
Output Port 36 : plataforma 77 Input Port 1
Output Port 37 : plataforma 78 Input Port 1
Output Port 38 : plataforma 79 Input Port 1
Output Port 39 : plataforma 80 Input Port 1
Output Port 40 : plataforma 81 Input Port 1
Output Port 41 : plataforma T1 Input Port 1
Output Port 42 : plataforma T2 Input Port 1
Output Port 43 : plataforma T3 Input Port 1
Output Port 44 : plataforma T4 Input Port 1
Output Port 45 : plataforma T5 Input Port 1
Output Port 46 : plataforma T6 Input Port 1
Output Port 47 : plataforma T7 Input Port 1
Output Port 48 : plataforma T8 Input Port 1
Output Port 49 : plataforma T9 Input Port 1
Output Port 50 : plataforma TA Input Port 1
Output Port 51 : plataforma TB Input Port 1
No center connections

Sink608

Connections

Input Port 1 : Queue633 Output Port 1
Input Port 2 : PISTA 05L Output Port 2
No output connections
No center connections

Queue609

Connections

Input Port 1 : plataforma 51 Output Port 1
Input Port 2 : plataforma 50A Output Port 1
Input Port 3 : plataforma 50 Output Port 1
Input Port 4 : plataforma 49 Output Port 1
Input Port 5 : plataforma 48A Output Port 1
Input Port 6 : plataforma 48 Output Port 1
Output Port 1 : Sink646 Input Port 1
Output Port 2 : Sink645 Input Port 1
No center connections

Queue610**Connections**

Input Port 1 : plataforma TB Output Port 1
Input Port 2 : plataforma TA Output Port 1
Input Port 3 : plataforma T9 Output Port 1
Input Port 4 : plataforma T8 Output Port 1
Input Port 5 : plataforma T7 Output Port 1
Input Port 6 : plataforma T6 Output Port 1
Input Port 7 : plataforma T5 Output Port 1
Input Port 8 : plataforma T4 Output Port 1
Input Port 9 : plataforma T3 Output Port 1
Input Port 10 : plataforma T2 Output Port 1
Input Port 11 : plataforma T1 Output Port 1
Output Port 1 : Sink646 Input Port 2
Output Port 2 : Sink645 Input Port 2
No center connections

Queue614**Connections**

Input Port 1 : plataforma 55A Output Port 1
Input Port 2 : plataforma 55 Output Port 1
Input Port 3 : plataforma 54 Output Port 1
Input Port 4 : plataforma 53 Output Port 1
Input Port 5 : plataforma 52A Output Port 1
Input Port 6 : plataforma 52 Output Port 1
Output Port 1 : Sink646 Input Port 3
Output Port 2 : Sink645 Input Port 3
No center connections

Queue615**Connections**

Input Port 1 : plataforma 56 Output Port 1
Input Port 2 : plataforma 57 Output Port 1
Input Port 3 : plataforma 57A Output Port 1
Input Port 4 : plataforma 58 Output Port 1
Input Port 5 : plataforma 58A Output Port 1
Input Port 6 : plataforma 59 Output Port 1
Input Port 7 : plataforma 60 Output Port 1
Input Port 8 : plataforma 61 Output Port 1
Input Port 9 : plataforma 62 Output Port 1
Input Port 10 : plataforma 63 Output Port 1
Input Port 11 : plataforma 64 Output Port 1
Input Port 12 : plataforma 65 Output Port 1
Input Port 13 : plataforma 66 Output Port 1
Input Port 14 : plataforma 67 Output Port 1
Output Port 1 : Sink646 Input Port 4
Output Port 2 : Sink645 Input Port 4
No center connections

Queue616**Connections**

Input Port 1 : plataforma 75 Output Port 1
Input Port 2 : plataforma 76 Output Port 1
Input Port 3 : plataforma 77 Output Port 1
Input Port 4 : plataforma 78 Output Port 1
Input Port 5 : plataforma 79 Output Port 1
Input Port 6 : plataforma 80 Output Port 1
Input Port 7 : plataforma 81 Output Port 1
Input Port 8 : plataforma 74 Output Port 1
Input Port 9 : plataforma 73 Output Port 1
Input Port 10 : plataforma 72 Output Port 1
Input Port 11 : plataforma 71 Output Port 1
Input Port 12 : plataforma 70 Output Port 1
Input Port 13 : plataforma 69 Output Port 1
Output Port 1 : Sink646 Input Port 6
Output Port 2 : Sink645 Input Port 6
No center connections

Queue617**Connections**

Input Port 1 : COLA DESPEGUES Output Port 1
Output Port 1 : PISTA 05L Input Port 1
Center Port 1 : Queue620 Center Port 2

Center Port 2 : COLA ATERRIZAJES Center Port 2
Center Port 3 : Queue633 Center Port 2

Queue620

Connections

Input Port 1 : COLA DESPEGUES Output Port 2 Output Port 1 : PISTA 05R Input Port 2
Center Port 1 : COLA ATERRIZAJES Center Port 1
Center Port 2 : Queue617 Center Port 1

Queue633

Connections

Input Port 1 : PISTA 05R Output Port 2
Output Port 1 : Sink608 Input Port 1
Center Port 1 : COLA ATERRIZAJES Center Port 3
Center Port 2 : Queue617 Center Port 3

PISTA 05R635

Connections

No input connections
No output connections
No center connections

PISTA 05R637

Connections

No input connections
No output connections
No center connections

RODAJE ECO638

Connections

No input connections
No output connections
No center connections

RODAJE ECO639

Connections

No input connections
No output connections
No center connections

RODAJE B cabecera640

Connections

No input connections
No output connections
No center connections

RODAJE B cabecera641

Connections

No input connections
No output connections
No center connections

RODAJE B cabecera642

Connections

No input connections
No output connections
No center connections

RODAJE B cabecera643

Connections

No input connections
No output connections
No center connections

DESPEGUES A319

Connections

No input connections
Output Port 1 : COLA DESPEGUES Input Port 2
Output Port 2 : AJUSTE DESPEGUE Input Port 1
No center connections

COLA DESPEGUES

Connections

Input Port 1 : DESPEGUES A320 Output Port 1
Input Port 2 : DESPEGUES A319 Output Port 1
Input Port 3 : DESPEGUES ATR 42 Output Port 1
Input Port 4 : DESPEGUES B737 Output Port 1
Input Port 5 : DESPEGUES B737_800 Output Port 1
Input Port 6 : DESPEGUES EMBRAER EMB_190 Output Port 1
Input Port 7 : DESPEGUES EMBRAER ERJ_145 Output Port 1

Input Port 8 : DESPEGUES HEAVY Output Port 1
Input Port 9 : DESPEGUES LARGE Output Port 1
Input Port 10 : DESPEGUES SMALL Output Port 1
Output Port 1 : Queue617 Input Port 1
Output Port 2 : Queue620 Input Port 1

No center connections
ATERRIZAJES A320

Connections
No input connections
Output Port 1 : COLA ATERRIZAJES Input Port 2
Output Port 2 : AJUSTE ATERRIZAJES Input Port 2
No center connections

ATERRIZAJES ATR 42

Connections
No input connections
Output Port 1 : COLA ATERRIZAJES Input Port 3
Output Port 2 : AJUSTE ATERRIZAJES Input Port 3
No center connections

ATERRIZAJES B737

Connections
No input connections
Output Port 1 : COLA ATERRIZAJES Input Port 4
Output Port 2 : AJUSTE ATERRIZAJES Input Port 4
No center connections

ATERRIZAJES B737_800

Connections
No input connections
Output Port 1 : COLA ATERRIZAJES Input Port 5
Output Port 2 : AJUSTE ATERRIZAJES Input Port 5
No center connections

ATERRIZAJES EMBRAER EMB_190

Connections
No input connections
Output Port 1 : COLA ATERRIZAJES Input Port 6
Output Port 2 : AJUSTE ATERRIZAJES Input Port 6
No center connections

ATERRIZAJES EMBRAER ERJ_145

Connections
No input connections
Output Port 1 : COLA ATERRIZAJES Input Port 7
Output Port 2 : AJUSTE ATERRIZAJES Input Port 7
No center connections

ATERRIZAJES HEAVY

Connections
No input connections
Output Port 1 : COLA ATERRIZAJES Input Port 8
Output Port 2 : AJUSTE ATERRIZAJES Input Port 8
No center connections

ATERRIZAJES LARGE

Connections
No input connections
Output Port 1 : COLA ATERRIZAJES Input Port 9
Output Port 2 : AJUSTE ATERRIZAJES Input Port 9
No center connections

ATERRIZAJES SMALL

Connections
No input connections
Output Port 1 : COLA ATERRIZAJES Input Port 10
Output Port 2 : AJUSTE ATERRIZAJES Input Port 10
No center connections

DESPEGUES A320

Connections
No input connections
Output Port 1 : COLA DESPEGUES Input Port 1
Output Port 2 : AJUSTE DESPEGUE Input Port 2
No center connections

DESPEGUES ATR 42

Connections
No input connections

Output Port 1 : COLA DESPEGUES Input Port 3
Output Port 2 : AJUSTE DESPEGUE Input Port 3
No center connections

DESPEGUES B737

Connections

No input connections
Output Port 1 : COLA DESPEGUES Input Port 4
Output Port 2 : AJUSTE DESPEGUE Input Port 4
No center connections

DESPEGUES B737_800

Connections

No input connections
Output Port 1 : COLA DESPEGUES Input Port 5
Output Port 2 : AJUSTE DESPEGUE Input Port 5
No center connections

DESPEGUES EMBRAER EMB_190

Connections

No input connections
Output Port 1 : COLA DESPEGUES Input Port 6
Output Port 2 : AJUSTE DESPEGUE Input Port 6
No center connections

DESPEGUES EMBRAER ERJ_145

Connections

No input connections
Output Port 1 : COLA DESPEGUES Input Port 7
Output Port 2 : AJUSTE DESPEGUE Input Port 7
No center connections

DESPEGUES HEAVY

Connections

No input connections
Output Port 1 : COLA DESPEGUES Input Port 8
Output Port 2 : AJUSTE DESPEGUE Input Port 8
No center connections

DESPEGUES LARGE

Connections

No input connections
Output Port 1 : COLA DESPEGUES Input Port 9
Output Port 2 : AJUSTE DESPEGUE Input Port 9
No center connections

DESPEGUES SMALL

Connections

No input connections
Output Port 1 : COLA DESPEGUES Input Port 10
Output Port 2 : AJUSTE DESPEGUE Input Port 10
No center connections

Sink643

Connections

Input Port 1 : plataforma S3 Output Port 1
Input Port 2 : plataforma S4 Output Port 1
Input Port 3 : plataforma S5 Output Port 1
Input Port 4 : plataforma S6 Output Port 1
Input Port 5 : plataforma S7 Output Port 1
Input Port 6 : plataforma S8 Output Port 1
Input Port 7 : plataforma 1 Output Port 1
Input Port 8 : plataforma 2 Output Port 1
Input Port 9 : plataforma 3 Output Port 1
Input Port 10 : plataforma 4 Output Port 1
Input Port 11 : plataforma 5 Output Port 1
Input Port 12 : plataforma 6 Output Port 1
Input Port 13 : plataforma 8 Output Port 1
Input Port 14 : plataforma 9 Output Port 1
Input Port 15 : plataforma 10 Output Port 1
Input Port 16 : plataforma 11 Output Port 1
Input Port 17 : plataforma 12 Output Port 1
Input Port 18 : plataforma 13 Output Port 1
Input Port 19 : plataforma 15 Output Port 1
Input Port 20 : plataforma 16 Output Port 1
Input Port 21 : plataforma 17 Output Port 1
Input Port 22 : plataforma 18 Output Port 1

Input Port 23 : plataforma 20 Output Port 1
Input Port 24 : plataforma 21 Output Port 1
Input Port 25 : plataforma 22 Output Port 1
Input Port 26 : plataforma 23 Output Port 1
Input Port 27 : plataforma 24 Output Port 1
Input Port 28 : plataforma 25 Output Port 1
Input Port 29 : plataforma 26 Output Port 1
Input Port 30 : plataforma 27 Output Port 1
Input Port 31 : plataforma 28 Output Port 1
Input Port 32 : plataforma 29 Output Port 1
Input Port 33 : plataforma 30 Output Port 1
Input Port 34 : plataforma 31 Output Port 1
Input Port 35 : plataforma 31A Output Port 1
Input Port 36 : plataforma 32 Output Port 1
Input Port 37 : plataforma 33 Output Port 1
Input Port 38 : plataforma 33A Output Port 1
Input Port 39 : plataforma 34 Output Port 1
Input Port 40 : plataforma 35 Output Port 1
Input Port 41 : plataforma 35A Output Port 1
Input Port 42 : plataforma 36 Output Port 1
Input Port 43 : plataforma 37A Output Port 1
Input Port 44 : plataforma 37 Output Port 1
Input Port 45 : plataforma 38 Output Port 1
Input Port 46 : plataforma 40 Output Port 1
Input Port 47 : plataforma 39A Output Port 1
Input Port 48 : plataforma 39 Output Port 1
Input Port 49 : plataforma 41 Output Port 1
Input Port 50 : plataforma 41A Output Port 1
Input Port 51 : plataforma 42 Output Port 1
Input Port 52 : plataforma 43 Output Port 1
Input Port 53 : plataforma 44 Output Port 1
Input Port 54 : plataforma 45 Output Port 1
Input Port 55 : plataforma 46 Output Port 1
Input Port 56 : plataforma 46A Output Port 1
Input Port 57 : plataforma 47 Output Port 1
No output connections
No center connections

Sink645

Connections

Input Port 1 : Queue609 Output Port 2
Input Port 2 : Queue610 Output Port 2
Input Port 3 : Queue614 Output Port 2
Input Port 4 : Queue615 Output Port 2
Input Port 5 : plataforma 68 Output Port 2
Input Port 6 : Queue616 Output Port 2
No output connections
No center connections

Sink646

Connections

Input Port 1 : Queue609 Output Port 1
Input Port 2 : Queue610 Output Port 1
Input Port 3 : Queue614 Output Port 1
Input Port 4 : Queue615 Output Port 1
Input Port 5 : plataforma 68 Output Port 1
Input Port 6 : Queue616 Output Port 1
No output connections
No center connections

AJUSTE ATERRIZAJES

Connections

Input Port 1 : ATERRIZAJES A319 Output Port 2
Input Port 2 : ATERRIZAJES A320 Output Port 2
Input Port 3 : ATERRIZAJES ATR 42 Output Port 2
Input Port 4 : ATERRIZAJES B737 Output Port 2
Input Port 5 : ATERRIZAJES B737_800 Output Port 2
Input Port 6 : ATERRIZAJES EMBRAER EMB_190 Output Port 2
Input Port 7 : ATERRIZAJES EMBRAER ERJ_145 Output Port 2
Input Port 8 : ATERRIZAJES HEAVY Output Port 2
Input Port 9 : ATERRIZAJES LARGE Output Port 2
Input Port 10 : ATERRIZAJES SMALL Output Port 2

No output connections
No center connections

AJUSTE DESPEGUE

Connections

Input Port 1 : DESPEGUES A319 Output Port 2
Input Port 2 : DESPEGUES A320 Output Port 2
Input Port 3 : DESPEGUES ATR 42 Output Port 2
Input Port 4 : DESPEGUES B737 Output Port 2
Input Port 5 : DESPEGUES B737_800 Output Port 2
Input Port 6 : DESPEGUES EMBRAER EMB_190 Output Port 2
Input Port 7 : DESPEGUES EMBRAER ERJ_145 Output Port 2
Input Port 8 : DESPEGUES HEAVY Output Port 2
Input Port 9 : DESPEGUES LARGE Output Port 2
Input Port 10 : DESPEGUES SMALL Output Port 2
No output connections
No center connections

FlowItemBin Contents

B747

3D Shape : C:\Documents and Settings\AHerrera.INTRANETIMT\Mis documentos\Flexsim 5 Projects\MODELO DESPUES DE LAS 6\boing747.3DS

2D Shape : ***

3D Texture : ***

B747 : Color : Red : [0-1] = 0.960000 : [0-255] = 244.800000

B747 : Color : Green : [0-1] = 0.960000 : [0-255] = 244.800000

B747 : Color : Blue : [0-1] = 0.270000 : [0-255] = 68.850000

X Location : 0.000000

Y Location : 0.000000

Z Location : 0.000000

X Rotation : 0.000000

Y Rotation : 0.000000

Z Rotation : 0.000000

X Size : 14.910000

Y Size : 17.665000

Z Size : 2.820000

X Location Offset : 0.600000

Y Location Offset : 0.500000

Z Location Offset : 0.284157

X Rotation Offset : 0.000000

Y Rotation Offset : 0.000000

Z Rotation Offset : 90.000000

X Size Offset : 0.005102

Y Size Offset : 0.004328

Z Size Offset : 0.016521

A320

3D Shape : C:\Documents and Settings\AHerrera.INTRANETIMT\Mis documentos\Flexsim 5 Projects\MODELO DESPUES DE LAS 6\airbus-1.3DS

2D Shape : ***

3D Texture : ***

A320 : Color : Red : [0-1] = 0.960000 : [0-255] = 244.800000

A320 : Color : Green : [0-1] = 0.960000 : [0-255] = 244.800000

A320 : Color : Blue : [0-1] = 0.270000 : [0-255] = 68.850000

X Location : 0.000000

Y Location : 0.000000

Z Location : 0.000000

X Rotation : 0.000000

Y Rotation : 0.000000

Z Rotation : 0.000000

X Size : 8.525000

Y Size : 9.393000

Z Size : 2.940000

X Location Offset : 0.501567

Y Location Offset : 0.602916
Z Location Offset : -0.016619
X Rotation Offset : 0.000000
Y Rotation Offset : 0.000000
Z Rotation Offset : 180.000000
X Size Offset : 0.000917
Y Size Offset : 0.001092
Z Size Offset : 0.002964

ATR42

3D Shape : C:\Documents and Settings\AHerrera.INTRANETIMT\Mis documentos\Flexsim 5 Projects\MODELO DESPUES DE LAS 6\Airplane DC3 N270711.3DS

2D Shape : ***

3D Texture : ***

ATR42 : Color : Red : [0-1] = 0.960000 : [0-255] = 244.800000
ATR42 : Color : Green : [0-1] = 0.960000 : [0-255] = 244.800000
ATR42 : Color : Blue : [0-1] = 0.270000 : [0-255] = 68.850000
X Location : 0.000000
Y Location : 0.000000
Z Location : 0.000000
X Rotation : 0.000000
Y Rotation : 0.000000
Z Rotation : 0.000000
X Size : 6.143000
Y Size : 5.668000
Z Size : 1.898000
X Location Offset : 0.633000
Y Location Offset : 0.240000
Z Location Offset : -6.095867
X Rotation Offset : 0.000000
Y Rotation Offset : 0.000000
Z Rotation Offset : -90.000000
X Size Offset : 0.000663
Y Size Offset : 0.000978
Z Size Offset : 0.002766

LARGE

3D Shape : C:\Documents and Settings\AHerrera.INTRANETIMT\Mis documentos\Flexsim 5 Projects\MODELO DESPUES DE LAS 6\Boing 747.3DS

2D Shape : ***

3D Texture : ***

LARGE : Color : Red : [0-1] = 0.960000 : [0-255] = 244.800000
LARGE : Color : Green : [0-1] = 0.960000 : [0-255] = 244.800000
LARGE : Color : Blue : [0-1] = 0.270000 : [0-255] = 68.850000
X Location : 0.000000
Y Location : 0.000000
Z Location : 0.000000
X Rotation : 0.000000
Y Rotation : 0.000000
Z Rotation : 0.000000
X Size : 7.088000
Y Size : 7.162000
Z Size : 1.330000
X Location Offset : 0.500000
Y Location Offset : 0.508415
Z Location Offset : -0.000366
X Rotation Offset : 0.000000
Y Rotation Offset : 0.000000
Z Rotation Offset : -90.000000
X Size Offset : 0.034632
Y Size Offset : 0.029999

Z Size Offset : 0.090364

EMBRAER ERJ 145

3D Shape : C:\Documents and Settings\AHerrera.INTRANETIMT\Mis documentos\Flexsim 5 Projects\MODELO DESPUES DE LAS 6\Airplane_FALCON10 N030609.3DS

2D Shape : ***

3D Texture : ***

EMBRAER ERJ 145 : Color : Red : [0-1] = 0.960000 : [0-255] = 244.800000

EMBRAER ERJ 145 : Color : Green : [0-1] = 0.960000 : [0-255] = 244.800000

EMBRAER ERJ 145 : Color : Blue : [0-1] = 0.270000 : [0-255] = 68.850000

X Location : 0.000000

Y Location : 0.000000

Z Location : 0.000000

X Rotation : 0.000000

Y Rotation : 0.000000

Z Rotation : 0.000000

X Size : 7.475000

Y Size : 5.010000

Z Size : 1.690000

X Location Offset : 0.162000

Y Location Offset : 1.065000

Z Location Offset : 0.000000

X Rotation Offset : 0.000000

Y Rotation Offset : 0.000000

Z Rotation Offset : -90.000000

X Size Offset : 0.000002

Y Size Offset : 0.000002

Z Size Offset : 0.000006

SMALL

3D Shape : C:\Documents and Settings\AHerrera.INTRANETIMT\Mis documentos\Flexsim 5 Projects\MODELO DESPUES DE LAS 6\Airplane N160409.3ds

2D Shape : ***

3D Texture : ***

SMALL : Color : Red : [0-1] = 0.960000 : [0-255] = 244.800000

SMALL : Color : Green : [0-1] = 0.960000 : [0-255] = 244.800000

SMALL : Color : Blue : [0-1] = 0.270000 : [0-255] = 68.850000

X Location : 0.000000

Y Location : 0.000000

Z Location : 0.000000

X Rotation : 0.000000

Y Rotation : 0.000000

Z Rotation : 0.000000

X Size : 4.075000

Y Size : 4.287000

Z Size : 1.330000

X Location Offset : 0.500000

Y Location Offset : 0.500000

Z Location Offset : 0.480000

X Rotation Offset : 0.000000

Y Rotation Offset : 0.000000

Z Rotation Offset : 0.000000

X Size Offset : 0.003936

Y Size Offset : 0.004172

Z Size Offset : 0.012312

A319

3D Shape : C:\Documents and Settings\AHerrera.INTRANETIMT\Mis documentos\Flexsim 5 Projects\MODELO DESPUES DE LAS 6\volaris.skp

2D Shape : ***

3D Texture : ***

A319 : Color : Red : [0-1] = 0.960000 : [0-255] = 244.800000
A319 : Color : Green : [0-1] = 0.960000 : [0-255] = 244.800000
A319 : Color : Blue : [0-1] = 0.270000 : [0-255] = 68.850000
X Location : 0.000000
Y Location : 0.000000
Z Location : 0.000000
X Rotation : 0.000000
Y Rotation : 0.000000
Z Rotation : 0.000000
X Size : 8.525000
Y Size : 8.460000
Z Size : 2.940000
X Location Offset : 0.000000
Y Location Offset : 1.000000
Z Location Offset : 0.000000
X Rotation Offset : 0.000000
Y Rotation Offset : 0.000000
Z Rotation Offset : 90.000000
X Size Offset : 1.000000
Y Size Offset : 1.000000
Z Size Offset : 1.000000

EMBRAER EMB 190

3D Shape : C:\Documents and Settings\AHerrera.INTRANETIMT\Mis documentos\Flexsim 5 Projects\MODELO DESPUES DE LAS
6\Airbus.3DS
2D Shape : ***
3D Texture : ***
EMBRAER EMB 190 : Color : Red : [0-1] = 0.960000 : [0-255] = 244.800000
EMBRAER EMB 190 : Color : Green : [0-1] = 0.960000 : [0-255] = 244.800000
EMBRAER EMB 190 : Color : Blue : [0-1] = 0.270000 : [0-255] = 68.850000
X Location : 0.000000
Y Location : 0.000000
Z Location : 0.000000
X Rotation : 0.000000
Y Rotation : 0.000000
Z Rotation : 0.000000
X Size : 9.060000
Y Size : 7.180000
Z Size : 2.570000
X Location Offset : 0.499582
Y Location Offset : 0.500000
Z Location Offset : 0.559732
X Rotation Offset : 0.000000
Y Rotation Offset : 0.000000
Z Rotation Offset : 180.000000
X Size Offset : 0.000036
Y Size Offset : 0.000043
Z Size Offset : 0.000117

B737_800

3D Shape : C:\Documents and Settings\AHerrera.INTRANETIMT\Mis documentos\Flexsim 5 Projects\MODELO DESPUES DE LAS
6\boeing 737-800.skp
2D Shape : ***
3D Texture : ***
B737_800 : Color : Red : [0-1] = 0.960000 : [0-255] = 244.800000
B737_800 : Color : Green : [0-1] = 0.960000 : [0-255] = 244.800000
B737_800 : Color : Blue : [0-1] = 0.270000 : [0-255] = 68.850000
X Location : 0.000000
Y Location : 0.000000
Z Location : 0.000000
X Rotation : 0.000000

Y Rotation : 0.000000
Z Rotation : 0.000000
X Size : 9.875000
Y Size : 8.947000
Z Size : 3.143000
X Location Offset : 1.380000
Y Location Offset : 0.180000
Z Location Offset : 0.000000
X Rotation Offset : 0.000000
Y Rotation Offset : 0.000000
Z Rotation Offset : -115.000000
X Size Offset : 1.300000
Y Size Offset : 1.300000
Z Size Offset : 1.800000

B737

3D Shape : C:\Documents and Settings\AHerrera.INTRANETIMT\Mis documentos\Flexsim 5 Projects\MODELO DESPUES DE LAS
6\B737.skp

2D Shape : ***

3D Texture : ***

B737 : Color : Red : [0-1] = 0.960000 : [0-255] = 244.800000

B737 : Color : Green : [0-1] = 0.960000 : [0-255] = 244.800000

B737 : Color : Blue : [0-1] = 0.270000 : [0-255] = 68.850000

X Location : 0.000000

Y Location : 0.000000

Z Location : 0.000000

X Rotation : 0.000000

Y Rotation : 0.000000

Z Rotation : 0.000000

X Size : 6.902000

Y Size : 7.080000

Z Size : 2.820000

X Location Offset : -0.350000

Y Location Offset : 0.200000

Z Location Offset : 0.000000

X Rotation Offset : 0.000000

Y Rotation Offset : 0.000000

Z Rotation Offset : 23.000000

X Size Offset : 1.300000

Y Size Offset : 1.200000

Z Size Offset : 1.000000

Reports and Statistics

Group by Object

Connections and FlowItemBin

Strategy for Attending Takeoffs and Landings to Reduce the Aircraft Operating Costs and the Passenger Delays

Alfonso Herrera García¹ and Eric Moreno Quintero²

Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Querétaro, México; Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México

The objective of this research was to establish and evaluate a strategy for attending to the takeoffs and landings at congested airports, in order to reduce aircraft operating costs and passenger delay times. The continuous growth of air transport activity has created congestion at many major airports worldwide. As a consequence, aircraft must often remain in waiting lines before they could be attended onto the runways for takeoff or landing. This in turn increases the aircraft operating costs and passenger discomfort. In the strategy proposed the traditional rule for attending to aircraft, on a first-come-first-served basis, was substituted with a sequence that reduces operating costs and passenger delays. 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 showed that significant reductions of up to 47.6% in operating costs and 73.2% in passenger delays could be achieved. The main contribution of this paper is the establishment of a strategy that makes possible these savings. The amount of benefits achieved depends on the proportion of aircraft wake turbulence classes that operate in a given airport. In general, the largest benefits are obtained when there is a mixture of different classes and when they are in a proportion of 40% small and 60% heavy. By utilizing the strategy proposed herein it is possible to obtain significant benefits for both airlines and passengers.

Keywords: Airport, congestion, heuristic algorithm, operating cost, passenger delay, strategy

1. Introduction

Congestion in transportation occurs when demand from the infrastructure exceeds capacity, causing travel delays as one of the main symptoms (Roosens, 2008). Since several years ago it has been reported that there is a lack of sufficient airport capacity to meet air traffic demands. This has resulted in congestion problems and delays in the aviation system at many major airports around the world (Hamzawi, 1992). There has been a rapid increase of air traffic over the past six

¹ Km 12+000, Carretera Querétaro-Galindo, Sanfandila, Mpo. Pedro Escobedo, CP 76700, Querétaro, México, T: +524422169777, F: +524422169671, E: alfonso.herrera@imt.mx

² Km 12+000, Carretera Querétaro-Galindo, Sanfandila, Mpo. Pedro Escobedo, CP 76700, Querétaro, México, T: +524422169777, F: +524422169671, E: emoreno@imt.mx

decades worldwide, and this trend is forecasted to continue. The result has been severe congestion and very costly delays at more than 100 international airports around the globe. For instance, as traffic levels grew the first delays started to affect European airports in the late 70s and early 80s; with the traffic build-ups in the 1990s the delays increased (Eurocontrol, 2009). This congestion affects several of the airport sub-systems, most notably the runway which is the critical element in determining maximum capacity of any airport. As traffic continues to increase, so will these problems. For example, it is believed that the capacity problem in the United States (USA) and the Europe Union (EU) will probably become worse after the implementation of the open skies agreement (Turner, 2007). According to recent studies if nothing is done to avert the problem, 60% of European airports will be heavily congested by 2025 (ICAO and McGill University, 2006).

Today, hub congestion is a major concern because it causes significant problems at airports such as flight delays, cancellations and missed connections that consequently affect both airlines and air-travelers (Flores, 2010). This congestion increases airline operating costs because delays require these companies have to spend additional resources for the operation of aircraft, for example crew wages, jet fuel, and maintenance services when these vehicles must be held in line ups awaiting takeoffs or landings. In addition, the passengers are adversely affected wasting time as result of these queues.

Pilots must adhere to the regulations and procedures established by the air traffic control (ATC) which are standardized through international agreements. The primary purpose of ATC services worldwide is to prevent mid air and ground collisions, and to expedite and maintain an orderly flow of air traffic (ICAO, 1996). The assignment and authorization of arrivals and departures of aircraft is made by the ATC according to the sequence of request. Although there are certain exceptions, the rule followed is that of first-come-first-served (FCFS) (FAA, 2010).

Different solutions for mitigating the demand-capacity imbalance at airports have been proposed. In addition, various ATC decision-support tools have been developed in an attempt to match the demand to existing capacities that are more efficient and effective. However, all these tools have been applied, respecting the FCFS aircraft service priority rule. The partial exception is in the United States, where a traffic management advisor (TMA) has been used (Janic, 2009).

Furthermore, there has been other investigative work that abandons the FCFS-principle, but only considers landings. For instance, Soomer and Koole (2008) use the Aircraft Landing Problem (ALP) to illustrate various definitions of fairness that stem from the use of airline preferences. In this problem, a landing order and feasible landing times have to be determined for a set of flights at a given runway. Results show that it is possible to achieve more fairness while obtaining considerable cost savings as compared to the First Come First Served schedule. Another research project addresses the problem of scheduling aircraft landings at an airport (Wen, 2005). Given a set of airplanes and runways, the objective of this thesis was to minimize the total deviation from the target landing time for each plane. It was the first attempt to develop a branch-and-price exact algorithm for the ALP. Finally, Lee (2008) developed a dynamic programming algorithm for determining the minimum arrival cost schedule, using the aircraft-dependent delay costs. The proposed approach makes it possible to determine various tradeoffs considering multiple objectives in terminal-area operations.

The FCFS rule does not take into account that the operating costs and seating capacities of various aircraft are different. For instance, the operating cost of a Boeing 747, with 452 passenger capacity, is eightfold as compared to an ATR-42 with a 48 passenger capacity; and the Boeing 747 can transport 9.4 times more passengers than the ATR-42, see Table 1. Consequently, if the attention sequence of aircraft in a waiting line is reordered, it is possible to obtain significant savings in operating costs and reduce passenger delays. The solution to the problem consists of determining the sequence of attention that best reduces such costs and delays.

In this article a strategy is established and evaluated for takeoffs and landings at congested airports in order to reduce aircraft operating costs and passenger delays. The approach used for solving this problem consists of a procedure that obtains the aircraft attention order, without enumerating all the possible sequences. Consequently solutions can be obtained in a short time.

Results indicate that the benefits of applying the strategy proposed herein depend on the proportion of aircraft wake turbulence classes that operate at a given airport. This can significantly reduce operating costs, as much as 47.6% and passenger delays up to 73.2% when compared to the current FCFS rule.

Table 1. Typical operational characteristics of different aircraft

Aircraft	Operating cost per unit of time (€/s)	Typical seating	Wake turbulence class	Particular operation time (s)	
				Takeoff	Landing
Learjet 36	0.196	6	Small	78	79
EMB-120	0.299	30	Small	79	80
DHC 8-100	0.320	39	Small	71	96
ATR-42	0.331	48	Small	57	93
ATR-72	0.428	70	Large	48	78
Boeing 737-300	0.621	140	Large	66	67
Boeing 737-500	0.659	108	Large	65	66
DC-9-30	0.693	115	Large	65	66
MD-80	0.713	145	Large	59	80
Airbus A320	0.747	150	Large	62	84
Boeing 727-200	0.837	163	Large	41	61
Boeing 767-300	1.075	269	Heavy	52	53
Airbus A300-600	1.255	267	Heavy	52	53
Airbus A330-300	1.312	328	Heavy	53	54
Boeing 777-200	1.359	440	Heavy	47	64
DC-10-30	1.918	250	Heavy	50	67
Boeing 747-200	2.773	452	Heavy	54	67

Source: Original table, see text.

The operating costs illustrated in Table 1 were obtained by updating to 2010, the respective costs established by the International Civil Aviation Organization (ICAO) in 2000 (ICAO, 2000). According to the ICAO the total operating costs are the sum of the fuel costs and other costs. The component related with the jet fuel price was updated using the jet fuel price index established by the International Air Transport Association (<http://www.iata.org>). The index used (222.2) corresponds to that established for February 2010; this index was equal to 100 in the year 2000. In the case of other costs, an annual increase of 3% was considered; furthermore, an exchange rate of 1 Euro = 1.3572 dollars was factored in.

The number of seats in each aircraft might change depending on the class configurations applied by each airline. The values shown are typical figures.

The aircraft wake turbulence classes are based on their maximum certificated takeoff weight (MCTOW). Current US standards consider three aircraft classes (FAA, 2010): *Heavy* aircraft capable of taking off with weights of more than 255,000 pounds whether or not they are

operating at this weight during a particular phase of flight; *Large* aircraft of more than 41,000 pounds, and up to 255,000 pounds; and *Small* aircraft carrying 41,000 pounds or less.

The particular operation time values are mean figures obtained from operations at Mexico City International Airport; these values could fluctuate in other airports. Note that in general the highest values belong to the small aircraft and the lowest to the heavy aircraft; therefore, the ICAO separation distance is implicit in the operation time.

2. Methodology

2.1 The approach enumerating all possible alternatives

The first approach to finding the optimum solution for a problem is to enumerate all the possible alternatives. This method is reliable, but since the amount of possible solutions rapidly increases with the amount of variables, it is not feasible to obtain a solution in a reasonable computing time, as is the case with problems considering a medium or large number of variables (Fernández, 2009).

In the case of a waiting line with n aircraft requesting service for landing or takeoff on the runway at a given airport, the number of possible sequences to attend to these would be $n!$

The formulation of the problem is as follows: consider that the runway of an airport must attend to the requests for service of a certain number of aircraft $n = \{A, B, C, \dots, N\}$. Each one of the aircraft has two important characteristics: the operating cost per unit of time (c_i) and the particular operation time for service (t_i) during takeoffs or landings.

The total time for service that corresponds to the n -th aircraft according to the attention sequence is defined as τ_n . This represents the interval of time between when aircraft n requests service and when this is completed. Note that the total time for service for any aircraft, in the air or not, is equal to the sum of the particular operation times of the aircraft being attended to, plus its own particular operation time.

In this manner, for a group of aircraft awaiting service on a given runway, the aircraft n will have a total service time equal to:

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

For a group of n aircraft the operating cost (OC) is:

$$OC = c_A(\tau_A) + c_B(\tau_B) + c_C(\tau_C) + \dots + c_N(\tau_n) \quad (2)$$

Exact solution for two aircraft

In the case of two aircraft (A and B) that are in a waiting line, there are two possible sequences ($2! = 2$). One way to deal with this is to attend first to aircraft A and then aircraft B (A→B); the other possibility is to attend to aircraft B first and later to aircraft A (B→A).

The operating costs for these cases are:

$$OC_{A,B} = c_A(\tau_A) + c_B(\tau_B) = c_A(t_A) + c_B(t_A+t_B) = c_A t_A + c_B t_B + c_B t_A \quad (3)$$

$$OC_{B,A} = c_B(\tau_B) + c_A(\tau_A) = c_B(t_B) + c_A(t_B+t_A) = c_A t_A + c_B t_B + c_A t_B \quad (4)$$

Note that the sequence of attention directly influences operating costs. In the aforementioned situation the minimum operating cost will correspond to the minimum value of the product $c_B t_A$ or $c_A t_B$. Also, note that the order of attention that minimizes operating cost depends exclusively

on the c_i and t_i values. Therefore, the accuracy of these figures is critical for the results that are obtained.

Exact solution for three, four and five aircraft

In the case of three aircraft ($n = 3$), there are six possible sequences of attention ($3! = 6$).

Applying (2) the operating costs are:

$$OC_{A,B,C} = c_A(t_A) + c_B(t_A+t_B) + c_C(t_A+t_B+t_C)$$

$$OC_{A,C,B} = c_A(t_A) + c_C(t_A+t_C) + c_B(t_A+t_C+t_B)$$

$$OC_{B,A,C} = c_B(t_B) + c_A(t_B+t_A) + c_C(t_B+t_A+t_C)$$

$$OC_{B,C,A} = c_B(t_B) + c_C(t_B+t_C) + c_A(t_B+t_C+t_A)$$

$$OC_{C,A,B} = c_C(t_C) + c_A(t_C+t_A) + c_B(t_C+t_A+t_B)$$

$$OC_{C,B,A} = c_C(t_C) + c_B(t_C+t_B) + c_A(t_C+t_B+t_A)$$

In the case of four aircraft ($n = 4$), there are 24 possible sequences of attention ($4! = 24$). Using (2) it is possible to obtain the operating costs. Only the first and the last sequence are listed below.

$$OC_{A,B,C,D} = c_A(t_A) + c_B(t_A+t_B) + c_C(t_A+t_B+t_C) + c_D(t_A+t_B+t_C+t_D)$$

·
·
·

$$OC_{D,C,B,A} = c_D(t_D) + c_C(t_D+t_C) + c_B(t_D+t_C+t_B) + c_A(t_D+t_C+t_B+t_A)$$

In the case of five aircraft ($n = 5$), there are 120 possible sequences of attention ($5! = 120$). Again applying (2) it is possible to obtain the operating costs. Here again, only the first and the last sequence are listed below.

$$OC_{A,B,C,D,E} = c_A(t_A) + c_B(t_A+t_B) + c_C(t_A+t_B+t_C) + c_D(t_A+t_B+t_C+t_D) + c_E(t_A+t_B+t_C+t_D+t_E)$$

·
·
·

$$OC_{E,D,C,B,A} = c_E(t_E) + c_D(t_E+t_D) + c_C(t_E+t_D+t_C) + c_B(t_E+t_D+t_C+t_B) + c_A(t_E+t_D+t_C+t_B+t_A)$$

Note that if there are a few aircraft in the waiting line, it is possible to solve the problem using a worksheet, but this rapidly becomes more difficult with more aircraft being considered. For instance, in the case of six aircraft, there are 720 alternatives; for 10 aircraft, there are 3,628,800 possible sequences; for 15 aircraft, there are more than one billion possible arrangements, $15! = 1,307,674,368,000$; and for 20 aircraft there would be more than two trillions of possibilities, $20! = 2,432,902,008,176,640,000$. Consequently, in these cases it is difficult to list all the alternatives on a worksheet.

2.2 The approach using a heuristic algorithm

The approach is based on three principles which were established from the observation of the behaviour regarding the sequences for queues of two, three, four and five aircraft. In all these

cases the equations indicated in the sub-headings 2.1 and 2.2 were applied and the three principles were verified. Furthermore, the results show that by applying these principles that not only it is possible to reduce the operating costs and passenger delays, but also to obtain minimum values, at least for queues of two to five aircraft. Note that the concept of queue is referred as a virtual queue, because the aircraft could be flying and/or on the ground, awaiting authorization to land or takeoff.

Principle one: Consider a group of $n-1$ aircraft in which case the sequence of attention that produces the minimum operating cost is known. Assume that later the n -th aircraft is added; the order of attention that presents the minimum operating cost for this new group corresponds to some of the n alternatives in which the aircraft n is placed at the beginning, middle, or end of the attention sequence that offers the minimum operating costs initially considered for the $n-1$ aircraft.

For instance, consider that there are three aircraft A, B, and C; and that the sequence of attention that produces the minimum operating cost is $A \rightarrow B \rightarrow C$. Assume that later a fourth aircraft D is added. Then the order of attention that presents the minimum operating cost for this new group corresponds to some of the following four possible alternatives:

$D \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow C$

$A \rightarrow D \rightarrow B \rightarrow C$

$A \rightarrow B \rightarrow D \rightarrow C$

$A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D$

This principle creates the possibility to obtain the sequence that offers minimum operating cost faster and without enumerating and calculating all the possibilities. In the aforementioned case, it is necessary to calculate the values for only four cases, although there are a total of 24 alternatives. This means that 20 cases (83.33%) are discarded. This principle is even more advantageous when there are more aircraft in a waiting line. For example, if $n = 5$ aircraft, 95.83% alternatives ($1 - (n/n!)$) are discarded; and for 9 aircraft, 99.99% cases are discarded. These figures show the advantage of applying this principle.

Principle two: The order of attention that produces the maximum operating cost is the inverse order of the sequence for the minimum operating cost.

For instance, if the minimum operating cost corresponds to the sequence A,B,C,... N, then the inverse order of that sequence (N,... C,B,A) produces the maximum operating cost.

Principle three: The value of the average operating cost is the mean of the minimum and maximum values.

For instance, using the equations obtained for two, three, four and five aircraft; and considering the following data taken from Table 1, it is possible obtain the respective operating costs.

$$C_A = 0.331 \text{ €/s}; t_A = 57 \text{ s}$$

$$C_B = 0.747 \text{ €/s}; t_B = 84 \text{ s}$$

$$C_C = 2.773 \text{ €/s}; t_C = 54 \text{ s}$$

$$C_D = 0.837 \text{ €/s}; t_D = 61 \text{ s}$$

$$C_E = 0.196 \text{ €/s}; t_E = 78 \text{ s}$$

The results are shown in Figure 1. It is observed that the operating cost values are scattered within a specific rank.

However, if the results are arranged according to their values, then it should be noted that there is an apparent symmetry among them, see Figure 2.

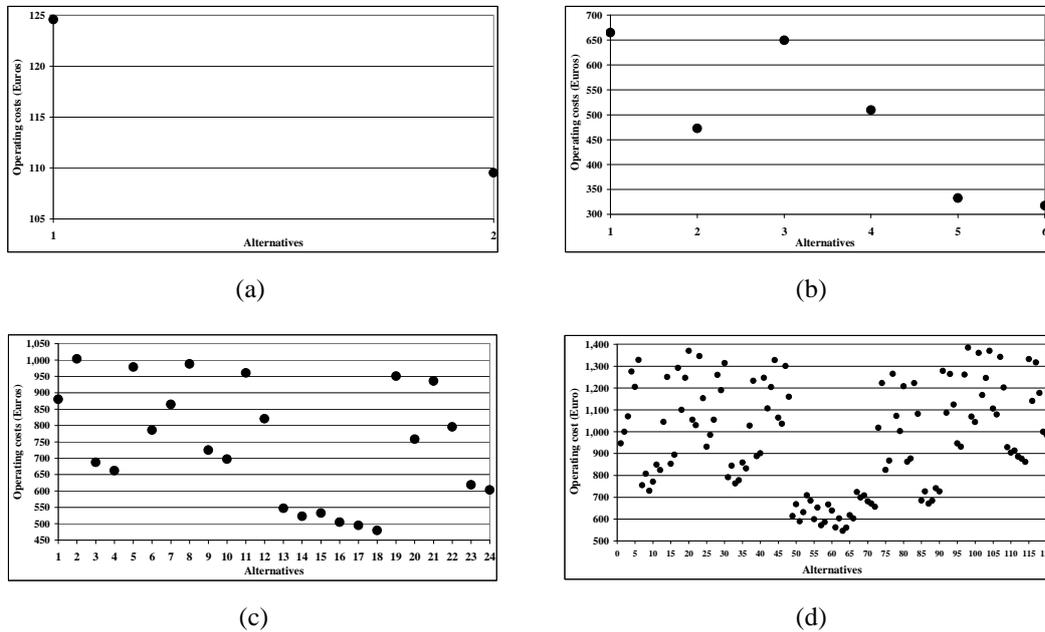


Figure 1. Operating costs for two (a), three (b), four (c) and five (d) aircraft

Source: Original figure.

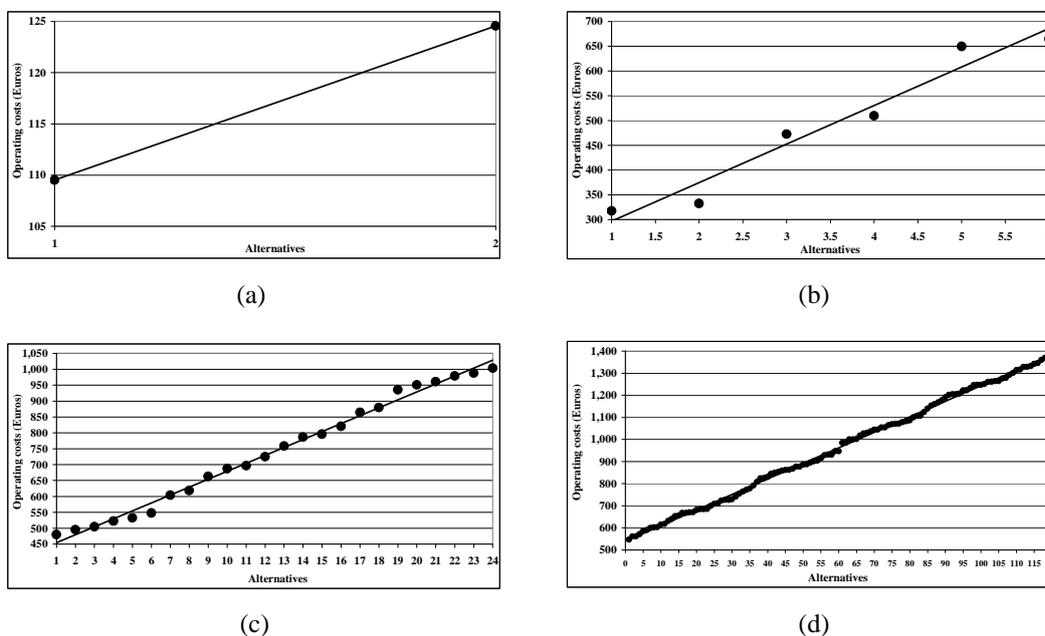


Figure 2. Operating costs arranged according to their values for two (a), three (b), four (c) and five (d) aircraft

Source: Original figure.

Note that a tendency line was incorporated into each graphic to better visualize the data distribution. In order to verify the symmetry, the differences between each pair of consecutive values were calculated for use in a table. Later, the first value was subtracted from the last, then from the second the penultimate, and so on; resulting in a table filled with zeros. This means that the operating cost values are symmetric in all cases.

Therefore, because there are symmetries in the values obtained in each sequence, it is sufficient to obtain the mean of the minimum and maximum values for calculating the average, without considering all the intermediate figures.

The approach applied to the passenger delays

By using the aforementioned procedure it is possible to obtain the order of attention that produces the minimum value for passenger delays (for instance, in terms of passenger-minute), if instead of the operating cost per unit of time (c_i) is used the number of passengers in each aircraft (p_i).

The passenger delay (PD) for a group of aircraft A, B, C, ...,N, is:

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

Note that this equation has the same structure obtained for the operating costs, see equations for three, four and five aircraft in sub-heading 2.1. Therefore, the equivalent principles previously pointed out apply to passenger delays.

3. Application of the methodology

The aforementioned methodology was applied to determine the potential benefits of reordering the sequences of attention given to aircraft, during takeoffs and landings, in a hypothetical airport. The benefits were quantified in terms of the reduction of operating costs and passenger delays.

It was assumed that approximately 50% of the movements on the runway were takeoffs and 50% landings, because this is the proportion that normally occurs in airports. In order to exemplify the application of the methodology two cases of queues were considered, five and ten aircraft. The average values of operating costs and passenger delays correspond to the current FCFS policy, because there is a trend toward these values when a group of operations are performed in a random manner. The values were obtained with the heuristic algorithm which corresponds to the proposed strategy. The data used to apply the methodology was taken from Table 1.

3.1 Case for queues of five aircraft

Table 2 shows the results for operating costs. In this case groups of five aircraft of different proportions according to wake turbulence classes, small, large and heavy, were considered. Because each group consisted of five aircraft, the minimum unit of increase was 20%. Note all the possible combinations of the three aircraft classes were considered.

This table is ordered according to the sixth column which is the difference between the fifth and fourth columns and represents reduction of operating costs utilizing the proposed strategy instead of the current FCFS rule. The last column shows reductions in percentage. It is noteworthy that the total time of service ranges from 4 minutes 37 seconds to 6 minutes 36 seconds.

In regard to the sequence of attention that reduces the operating costs and delays, results indicate that in all the cases these groups of aircraft were ordered according to their classes, and that the sequence for attending to these groups always followed this priority: heavy, large and small.

Also, it was noted that in most cases within the same aircraft class, the highest values of c_i for the operating costs, and p_i for the delays, corresponded to the aircraft that were attended to first.

Following the same procedure and structure used for the operating costs, Table 3 shows the results for delays, in terms of passenger-minute.

Table 2. Operating costs obtained for a queue of five aircraft considering the current FCFS rule and the strategy proposed herein

Percentage of aircraft at the queue, according to the wake turbulence class (%)			Operating cost (€)		Reduction of the operating costs considering the proposed strategy instead of the current FCFS rule	
Small	Large	Heavy	Proposed strategy	Current FCFS rule	€	%
100	0	0	315.14	340.29	25.15	7.39
0	100	0	598.70	646.31	47.61	7.37
80	20	0	322.49	393.73	71.25	18.10
20	80	0	513.42	596.76	83.33	13.96
60	40	0	360.00	452.68	92.68	20.47
40	60	0	430.33	532.84	102.51	19.24
0	0	100	1,256.47	1,436.66	180.19	12.54
0	80	20	669.53	885.27	215.73	24.37
20	60	20	563.39	835.04	271.65	32.53
40	40	20	473.80	767.57	293.77	38.27
80	0	20	389.37	687.50	298.14	43.37
0	20	80	1,082.20	1,382.39	300.19	21.72
60	20	20	431.22	735.40	304.18	41.36
0	60	40	791.83	1,103.24	311.41	28.23
20	40	40	678.67	1,047.04	368.36	35.18
20	0	80	1,007.56	1,381.86	374.31	27.09
0	40	60	925.69	1,303.03	377.34	28.96
40	20	40	623.98	1,026.80	402.82	39.23
60	0	40	576.75	1,007.00	430.24	42.73
20	20	60	854.91	1,296.03	441.12	34.04
40	0	60	795.52	1,286.28	490.76	38.15

Source: Original table.

3.2 Case for queues of ten aircraft

The same procedure used for queues of five aircraft was applied to queues of ten aircraft. In this case groups of ten aircraft were considered in all the possible combinations in relation to the three aircraft classes. Because each group consisted of ten aircraft, the minimum unit of increase was 10%. The results show that the total time of service ranges from 9 minutes 14 seconds to 13 minutes 12 seconds. In relation to the sequence of attention that reduces the operating costs and delays, it was noted the same behaviour occurred as in the case of five aircraft.

3.3 Analysis of results

In general when a queue has only one class of aircraft the benefits are lower than when there is a mixture of classes. These benefits are established as the reductions of operating costs and passenger delays, considering absolute or percentage values. In relative terms, the results showed that significant reductions of up to 47.6% in operating costs and 73.2% in passenger delays could be achieved, depending on the proportions of aircraft classes.

In the case of five aircraft the maximum benefits in absolute values for operating costs and delays were obtained using a proportion of 40% small and 60% heavy; however, for the case involving ten aircraft, the maximum benefit in terms of operating costs corresponded to a proportion consisting of 60% small and 40% heavy, and regarding delays there were 40% for small and 60% for heavy.

Table 3. Delays obtained for a queue of five aircraft considering the current FCFS rule and the strategy proposed herein

Percentage of aircraft at the queue, according to the wake turbulence class (%)			Delay (passenger-minute)		Reduction of delays considering the proposed strategy instead of the current FCFS rule	
Small	Large	Heavy	Proposed strategy	Current FCFS rule	Passenger-minute	%
100	0	0	281.13	406.76	125.63	30.88
0	100	0	1,222.23	1,457.32	235.09	16.13
80	20	0	343.36	674.16	330.80	49.07
20	80	0	858.43	1,253.47	395.04	31.52
0	0	100	2,740.91	3,184.93	444.01	13.94
40	60	0	584.02	1,039.08	455.06	43.79
60	40	0	409.45	880.40	470.95	53.49
0	80	20	1,200.69	1,811.22	610.54	33.71
0	20	80	1,978.28	2,696.92	718.64	26.65
0	60	40	1,249.13	2,079.91	830.78	39.94
20	60	20	806.17	1,644.83	838.67	50.99
80	0	20	321.58	1,201.83	880.25	73.24
0	40	60	1,631.33	2,559.28	927.95	36.26
40	40	20	596.18	1,555.49	959.30	61.67
60	20	20	395.67	1,377.06	981.38	71.27
20	0	80	1,616.93	2,664.58	1,047.65	39.32
20	40	40	956.99	2,030.99	1,074.00	52.88
40	20	40	702.62	1,922.67	1,220.05	63.46
20	20	60	1,274.34	2,502.72	1,228.38	49.08
60	0	40	498.17	1,774.46	1,276.29	71.93
40	0	60	1,012.15	2,431.35	1,419.19	58.37

Source: Original table.

The maximum benefit is obtained when there is a mixture of small and heavy classes (zero percentage of large class), because the heavy aircraft with the highest C_i and lowest t_i values are attended to first, and the small aircraft with the lowest C_i and highest t_i values are attended later.

The influence of the aircraft size in determining the priority of attention is related to the operation costs per unit of time and the particular operation times of each class. Due to the steepest growing of c_i from the small class to the heavy class, as compared with the growth of the corresponding t_i , the contribution to total costs of heavy class aircraft grows faster regarding time than those of smaller classes. Therefore, it seems reasonable to attend to the bigger aircraft first and then the smaller ones.

Also, it was generally observed that a proportion of 80% small class and 20% heavy class were accommodated when the maximum benefit in relative terms was obtained. Consequently, this proportion of aircraft appears to follow the Pareto principle, an issue to consider for future research.

The length of the queue is proportional to the potential benefit. For instance, in the case of five aircraft queues a reduction of up to €490.76 in the operating costs was achieved, but for ten aircraft queues the reduction was up to €1,523.14; which implies that duplicating the size of the queue, triples the benefits. In the case of the delays, for queues of five aircraft a reduction of up to 1,419.19 passenger-minute was achieved, but for ten aircraft queues this reduction was up to 5,313.02 passenger-minute; therefore, by duplicating the size of the queue, the benefits are increased almost fourfold.

The relevance of aircraft size to determine the priority of attention offered in the queues was tested measuring the Spearman correlation coefficient R of aircraft size (in terms of MCTOW) versus attention priority. In many cases high values of R were obtained with good p -values for significance, in general for combinations of several size classes. However, for groups with a single class of aircraft, non-significant low values of R resulted. Also, it was noted that in order to obtain the minimum operating cost, the heavy class always had priority over the large and small classes, and the large class had priority over the small class. Therefore, it seems that size of aircraft represented by its class is an important issue in order to determine the priority of attention. However, the order of attention within the same aircraft class is not always defined by the MCTOW. Although the aircraft size is an important factor to obtain the order of attention that minimizes the operating cost, it is not a determining factor.

4. Discussion

It is important to point out that the proposed strategy does not reduce the size of the queues. It simply reorders the sequence of attention given to each aircraft to reduce the operating costs and passenger delays.

Although the greatest benefits of the proposed strategy were obtained when there was a mixture of different aircraft classes, and when they were in a proportion of 40% small and 60% heavy, this does not mean that it is recommended to manage that mixture. On the contrary, the recommendation is to manage a homogenous class of aircraft during takeoffs and landings. The interpretation of the findings is that in airports that manage a mixture of aircraft classes, it is possible to reduce negative effects for operators and passengers by changing the sequence of attention given to the aircraft.

According to the results, it is evident that in order to reduce the operating costs and delays, the largest aircraft must be attended to first and the smaller ones later. There are two important implications here. On the one hand, this condition promotes the use of larger aircraft because they will have the advantage of being attended to first. On the other hand, the use of large aircraft can decrease runway congestion, although it could congest other processing facilities within the airport. Certain studies indicate that the area that would be most affected is the baggage claim system (Chiu and Walton, 2002 and 2003). Therefore, the application of the suggested strategy must also take this into consideration.

Note that the total time of service represents the maximum value that an aircraft should wait before being attended to; consequently, this value could be the reference used to determine if the proposed strategy should be applied or not. For instance, if aircraft must not be delayed more than 15 minutes, it is possible to apply this strategy for queues of ten aircraft.

During 2009, in Europe alone, 38% of flights were delayed for departure and 36% for arrival. Also, it was reported that among the top 50 airports most affected in regarding departures, that the average delay per movement ranged from 9.3 to 18.9 minutes; and for the top 50 airports most affected regarding arrivals, this ranged from 8.9 to 19.3 minutes (Eurocontrol, 2010). In addition statistics for the top 30 airports worldwide according to aircraft movements during 2008 show that 23 of these airports are located in America, 21 are in USA and the others are in Toronto and Mexico City; six are in Europe, Paris/Charles-De-Gaulle, Frankfurt, London/Heathrow, Madrid/Barajas, Amsterdam and Munich; and the last is in Asia, Beijing (Airports Council International, 2010). Airports with great activity have greater congestion that represents longer queues and delays; for instance, the six aforementioned European airports reported significant delays (Eurocontrol, 2010). Consequently, there is substantial potential for applying the proposed strategy at many airports in America, Europe and Asia.

There are several administrative policies that could promote the application of the strategy for attending to takeoffs and landings in order to reduce the aircraft operating costs. In general terms there are three alternatives:

Option 1. In this case each airline receives the increases or reductions in its operating costs. In this option some airlines will be granted reductions in operating costs while others will incur increases. However, the group of aircraft as a unit reduces its total operating cost.

Option 2. In this alternative part of the benefits obtained by the airlines that reduced operating costs are transferred to the airlines that received increases. The magnitude of such transfers has a maximum value that could maintain the original operating cost of the airlines initially affected. In this case the benefits initially gained by the airlines attended to first are reduced, but the aircraft that originally had increased operating costs now reduce these costs or at the very least maintain original values.

Option 3. A third possibility occurs when a greater proportion of the benefits are received by the airlines that initially had increased operating costs. The magnitude of the transfers is substantial enough so that these airlines reduce their original operating costs. Using this option all the airlines benefit because they all can reduce their overall operating costs.

In order to illustrate the application of the three options, assume that there is a queue of two aircraft, the first is an ATR-42 and the second a Boeing 747, and both wish to land at an airport. Using the information found in Table 1 the total operating cost is:

$$OC_{ATR-42,Boeing747} = 0.331(93) + 2.773(93+67) = 30.78 + 443.68 = €474.46$$

But if the strategy proposed herein is implemented to reduce the operating costs. The Boeing 747 will be attended to first and then the ATR-42; therefore, the total operating costs is:

$$OC_{Boeing747,ATR-42} = 2.773(67) + 0.331(67+93) = 185.79 + 52.96 = €238.75$$

According to option one, the Boeing 747 reduces operating costs (€443.68→€185.79), and the ATR-42 increases costs (€30.78→€52.96), although taken together the reduction of total operating cost is €238.75 instead €474.46. Applying option two, part of the benefits obtained by the Boeing 747 is transferred to the ATR-42, in order to maintain original operating cost. In this case, the Boeing 747 should transfer €22.18 (€52.96 - €30.78) to the ATR-42; therefore, the Boeing 747 has an operating cost of €207.97 (€185.79 + €22.18). Finally, if option three is applied, the Boeing 747 transfers €52.96 to the ATR-42 which means that the operating cost for this aircraft is zero. However, the operating cost of the Boeing 747 is €238.75. Using this option both aircraft benefit

because all reduce operating costs. The Boeing 747 reduced its operating costs from €443.68 to €238.75 and the ATR-42 reduced its operating cost from €30.78 to zero.

Option one is the most attractive for the airlines that are attended to first, but it is less attractive for the airlines attended to at the end of the queue. Using the second alternative it is possible that some aircraft will reduce their operating costs, namely those attended to first; and those attended to later will at the very least not increase their operating costs. Finally, the third option is probably the most viable because all the aircraft in general reduce their operating costs.

In addition to promoting the strategy, it is necessary to take at least two measures into consideration in order to implement it. These include: a) Measures related to the slot system; and b) Measures regarding new procedures for instrument approach and departure of aircraft. The first measure requires negotiations and agreements among the airlines that operate in a given airport, in order to modify the current slot system. This measure possesses economic implications that are closely related to the administrative policy that will promote the application of the strategy. The second measure is a technical issue that requires a solution for practical implementation of the strategy. It implicates the development of more flexible procedures than the methods currently utilized, because the new strategy does not apply the traditional FCFS rule.

5. Conclusion

The approach used for solving the problem is a procedure that obtains the aircraft attention order that reduces operating costs and passenger delays, without enumerating all the possible sequences. The advantage of this approach is that it does not require a lot of time to obtain the solution.

The results demonstrated that significant reductions of up to 47.6% for operating costs and 73.2% for passenger delays could be achieved by using the proposed strategy. These benefits depend on the proportion of the aircraft wake turbulence classes that operate in a given airport. In general, the largest benefits are obtained when there is a mixture of different classes and when they are in a proportion of 40% small and 60% heavy. As a result, if the proposed strategy was applied it is possible to obtain significant benefits for both airlines and passengers.

It was noted that in order to reduce the operating costs and delays, the largest aircraft must be attended to first and the smaller ones later. This condition promotes the use of large aircraft, but it could also congest other processing facilities within the airport, for instance, the baggage claim system.

There is a definite potential for applying the proposed strategy at many airports in America, Europe and Asia.

Three administrative policies were considered for promoting the proposed strategy. Apparently, the third option, in which all the aircraft reduce their operating costs, is the most viable. But, the feasibility of each option depends on the types and quantities of aircraft present in the waiting lines in each specific airport.

Although the potential benefits of applying the proposed strategy were quantified, future investigative work 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. Such a model will permit the establishment the actual length of queues and their composition considering the different classes of aircraft.

Acknowledgements

This research was supported by the Instituto Mexicano del Transporte and Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ). The authors would also like to thank Silvia C. Stroet of the Engineering Faculty at UAQ for her edition efforts and comments on the drafts.

References

- Airports Council International (2010). Available at:
http://www.aci.aero/cda/aci_common/display/main/aci_content07_c.jsp?zn=aci&cp=1-5-54-57_666_2 (accessed May 2010).
- Chiu, Chiung-Yu and 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 No. 1788*. Transportation Research Board, Washington, DC. USA.
- Chiu, Chiung-Yu and 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 (2009). Skyway magazine. Capacity, flight efficiency and emissions – the eternal triangle. Volume 13, Number 51, Spring 2009, p. 5.
- Eurocontrol (2010). Central Office for Delay Analysis (CODA) Digest – Delays to Air Transport in Europe. Annual 2009. pp. 3, 16, 18, 19 and 21.
- Federal Aviation Administration (FAA) (2010). Air Traffic Control. JO 7110.65T. U.S. Department of Transportation. Effective Date: February 11, 2010.
- Fernández, Candás Ruperto (2009). Optimización de la asignación de aeronaves a puertas de embarque en aeropuertos considerando el tiempo de rodadura. ISBN: 978-84-692-2862-3. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
- Flores, Fillol Ricardo (2010). Congested hubs. *Transportation Research Part B: Methodological*. Vol. 44, Issue 3, March. Pergamon Press, U.K.
- Hamzawi, Salah G. (1992). Lack of airport capacity: Exploration of alternative solutions. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. Vol. 26A, No. 1, January. Pergamon Press, U.K.
- International Civil Aviation Organization (ICAO) (1996). Procedures for Air Navigation Services, Rules of the Air and Air Traffic Services (PANS-RAC). Doc. 4444-RAC/501.
- ICAO (2000). ALLPIRG/4-WP/28 Appendix. Summer 2000. Available at:
www.icao.int/icao/en/ro/allpirg/allpirg4/wp28app.pdf (accessed February 2010).
- ICAO and McGill University (2006). Air navigation: Flying through Congested Skies.
- Janic, Milan (2009). Concept for Prioritizing Aircraft Operations at Congested Airports. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2106, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2009, pp. 100-108.
- Lee, Hanbong. (2008). Tradeoff evaluation of scheduling algorithms for terminal-area air traffic control, thesis (S.M.). Massachusetts Institute of Technology, Department of Aeronautics and Astronautics.
- Roosens, Paul (2008). Congestion and Air Transport: a challenging phenomenon. *EJTIR*, 8 No. 2, pp. 137-146.

Soomer M.J. and Koole G.M. (2008). Fairness in the Aircraft Landing Problem. VU University and National Aerospace Laboratory NLR, Amsterdam, the Netherlands.

Turner, A. (2007). Open Skies rewrites rules. *Flight International*, Vol. 171, No. 5078, p. 7.

Wen, M. (2005). Algorithms of Scheduling Aircraft Landing Problem, MSc thesis. Technical University of Denmark, (DTU).

www.iata.org. The jet fuel price index is available at:
http://www.iata.org/whatwedo/economics/fuel_monitor/price_development.htm (accessed February 2010).