



INSTITUTO  
MEXICANO DEL  
TRANSPORTE



*Certificación ISO 9001:2008 ‡*

---

---

# **MODELO DE SIMULACIÓN DE OPERACIONES AÉREAS EN AEROPUERTOS SATURADOS. EL CASO DEL AEROPUERTO INTERNACIONAL DE LA CIUDAD DE MÉXICO.**

**Alfonso Herrera García**

**Publicación Técnica No. 365  
Sanfandila, Qro, 2012**



---

**SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES**  
**INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE**

**Modelo de simulación de operaciones aéreas en aeropuertos saturados. El caso del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México.**

**Publicación Técnica No. 365**  
**Sanfandila, Qro, 2012**

---



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

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

También, se 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. La experiencia y sugerencias del personal académico especialista en transporte de la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ), en particular de los doctores Eduardo Betanzo Quezada, Saúl Obregón Biosca y Rebeca del Rocío Peniche Vera, sin duda mejoraron esta investigación. Gran parte del apoyo matemático se debe al Dr. Eric Moreno Quintero; y algunas aportaciones en aspectos económicos provienen del Dr. Guillermo Torres Vargas, ambos investigadores del IMT. Parte de los documentos utilizados para esta investigación, fueron obtenidos gracias a la gestión de Blanca Ordóñez Camacho, Jefa del Centro de Información y Documentación del IMT. De igual forma se agradece el apoyo y colaboración del tesista Santiago Servin Caballero, de la Universidad Autónoma de Chihuahua; y de los matemáticos de la UAQ, Eduardo Flores Franco, José Luis Varela Reyes y Wilfrido Jacobo Paredes García, 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 Torné, 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 provino de la investigadora de la CIT, Aurora Moreno Martínez. A todos ellos el autor agradece su apoyo y contribución oportuna y profesional.

En memoria de Francisco Heredia Iturbe (1938-2012), quien fue investigador titular del IMT.



# Índice

---

<b>Índice</b>	V
<b>Resumen</b>	VII
<b>Abstract</b>	IX
<b>Resumen ejecutivo</b>	XI
<b>1 Introducción</b>	1
1.1 Antecedentes y justificación	1
1.2 Los modelos de simulación	4
1.3 Planteamiento del problema	10
1.4 Hipótesis y objetivos	13
1.4.1 Hipótesis general	13
1.4.2 Objetivo general	13
1.4.3 Objetivos específicos	13
<b>2 Revisión de literatura</b>	15
2.1 Planeación y operación aeroportuaria	15
2.2 Control de tránsito aéreo	18
2.3 Aeronaves de gran capacidad	19
2.4 Resumen de la revisión bibliográfica	19
<b>3 Metodología</b>	21
3.1 Formulación del problema	21
3.2 Información operacional del AICM	24
3.2.1 Comportamiento general de las operaciones de aeronaves	24
3.2.2 Distribuciones empíricas de los tiempos de llegada y salida para los principales tipos de aeronaves, y pruebas de bondad de ajuste	30
3.3 Modelo conceptual	32
3.4 Construcción del modelo de simulación en un programa de cómputo	35
3.5 Pruebas piloto y validación del modelo	37
3.6 Diseño de los escenarios de simulación	39
3.6.1 Impacto originado por el crecimiento natural de la demanda de servicio	40
3.6.2 Efectos de las labores de mantenimiento en las pistas	42
3.6.3 Efectos de la presencia de condiciones ambientales adversas	43
3.6.4 Efecto de la aplicación de una nueva tecnología para incrementar la capacidad de las pistas	46
3.6.5 Efecto de la utilización intensiva de aeronaves de mayor capacidad	49
3.6.6 Efecto de la incorporación de infraestructura nueva	51
3.6.7 Impacto de una nueva estrategia para atender a las aeronaves durante las fases de despegue y aterrizaje	52
<b>4 Resultados y discusión</b>	55
4.1 Escenario relacionado con el impacto originado por el crecimiento natural de la demanda	55
4.2 Escenario para cuantificar los efectos de las labores de mantenimiento en las pistas	59
4.3 Escenario para estimar los efectos de la presencia de condiciones	

ambientales adversas	62
4.4 Escenario relacionado con el efecto de la aplicación de una nueva tecnología para incrementar la capacidad de las pistas	65
4.5 Escenario para estimar el efecto de la utilización intensiva de aeronaves de mayor capacidad	68
4.6 Escenario para cuantificar el efecto de la incorporación de infraestructura nueva	70
4.7 Escenario relacionado con el impacto de una nueva estrategia para atender a las aeronaves durante las fases de despegue y aterrizaje	72
<b>5 Conclusiones</b>	<b>75</b>
<b>6 Bibliografía</b>	<b>79</b>



# 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. El objetivo de este trabajo fue generar un modelo de simulación de este aeropuerto, considerando las principales variables operativas en pistas, calles de rodaje y plataformas, para evaluar propuestas que soporten la toma de decisiones relacionadas con su planeación y operación. Para su desarrollo, se estableció un modelo conceptual, se recolectó y procesó información operacional, posteriormente se codificó dicha información mediante el programa Flexsim y se validó mediante pruebas de bondad de ajuste. Los resultados, presentados mediante tablas y figuras, muestran que este aeropuerto alcanzará niveles operativos críticos en el 2015. También, se estimaron cuantitativamente los efectos de las labores de mantenimiento en pistas y el de condiciones meteorológicas adversas. Además, se evaluaron 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. 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.



# Abstract

---

The main challenge of the national airport system is the huge demand of services to be attended at the Mexico City International Airport. 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. In order to develop it, the conceptual model was established, operative data of the airport was gathered and processed. With this information the model was built using the Flexsim software, finally goodness of fit tests were applied to validate it. The results, that were presented using tables and figures, showed that this airport will reach critical operative levels at year 2015. Also, the effects of maintenance labors at runways and adverse meteorological conditions were quantified. 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. 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.



# **Resumen ejecutivo**

---

## **1 Introducción**

### **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 México. En Europa, cinco de sus aeropuertos principales funcionan en el límite de su capacidad.

El problema de la congestión es ya significativo y se espera que empeore. En Estados Unidos se estiman 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 este país, es del orden de 31,200 millones de dólares, por lo que la solución de este problema es innegablemente de gran importancia práctica.

Dentro de la infraestructura aeroportuaria del país destaca el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM), dado que ocupa el primer lugar en la actividad aérea nacional. 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.

### **Los modelos de simulación**

La simulación es la representación de la operación de algún proceso o sistema del mundo real a través del tiempo. 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. 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.

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. 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.

## **Planteamiento del problema**

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, lo que ha tenido como respuesta la ampliación y remodelación de la Terminal 1 a su máxima capacidad y la construcción de la nueva Terminal 2 de pasajeros. Sin embargo, debido a la falta de espacio no fue posible aumentar la capacidad de las pistas del AICM, las cuales constituyen el elemento crítico que limita su capacidad total.

Por ello, se requiere atender la insuficiencia de servicios aeroportuarios en el Valle de México instrumentando una solución a largo plazo, 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. Lo anterior implica que la principal infraestructura aeroportuaria de nuestro país, deberá cubrir la demanda actual y su crecimiento durante 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. También, evaluará los beneficios derivados de establecer una nueva política de atención de aeronaves, con objeto de minimizar los costos de operación de las mismas y las demoras de los pasajeros.

## **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.

## **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.

## **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.

## **2 Revisión de literatura**

En relación con la literatura relacionada con este proyecto se encontró que, entre 2000 y 2010, se han publicado 309 documentos con el tema de modelos de simulación aplicados a aeropuertos. En particular los temas relacionados con el modelo de simulación propuesto son: planeación y operación aeroportuaria, control de tránsito aéreo, y manejo de aeronaves de gran capacidad.

### **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.

Por otro lado, se detectaron seis artículos de modelos de simulación que sí abordan la infraestructura que se considera en esta investigación. 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.

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. 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.

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.

Herabat y McNeil (2004) exploraron el impacto de la implementación de la separación vertical mínima reducida en las aeronaves que operan en un aeropuerto grande. En el estudio fueron consideradas tres configuraciones de pistas. Los análisis se realizaron para un día completo de operaciones durante los meses pico y considerando dos condiciones meteorológicas, buenas y adversas.

### **Control de tránsito aéreo**

En cuanto a modelos de simulación que abordan el aspecto de control de tránsito aéreo (CTA), de catorce artículos identificados, sólo uno se relacionó con el tema de este trabajo. 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.

Es importante remarcar que la investigación señalada antes, considera 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.

### **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; y, por último, un modelo de simulación se aplicó para estimar la comodidad durante los despegues y aterrizajes de una aeronave de gran capacidad, en función de la rugosidad de la pista del aeropuerto; por lo que ninguno abordó los aspectos que se manejan en esta investigación.

## **3 Metodología**

La secuencia de pasos para construir el modelo de simulación y llevar a cabo pruebas con él, son los siguientes.

### **Formulación del problema**

El estudio de simulación debe iniciar con el establecimiento del problema a resolver. También, se requiere estar familiarizado profundamente con las características y propósito del sistema que va a ser modelado, con los escenarios que deben ser considerados y con los objetivos del estudio.

### **Información operacional del AICM**

En esta etapa se procesó información operacional detallada del AICM, con ésta 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.

Con objeto de determinar cuál distribución de probabilidad representaba mejor a cada conjunto de datos, fueron consideradas más de 20 diferentes tipos de distribuciones. Debido a que se observaron dos comportamientos en la operación típica del AICM, se establecieron dos submodelos diferentes, uno para el intervalo entre las cero y seis horas (submodelo 1); y el otro para el intervalo entre las seis y veinticuatro horas (submodelo 2).

### **Modelo conceptual**

En esta etapa se definieron los aspectos del sistema que fueron representados en el modelo. Además, se estableció con qué nivel de detalle se haría dicha representación.

### **Construcción del modelo de simulación en un programa de cómputo**

En esta etapa, el modelo conceptual establecido fue codificado en un programa de cómputo. Para ello, las distribuciones de llegadas y salidas obtenidas fueron incorporadas al modelo, además, de las capacidades y restricciones de sus distintos elementos.

### **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. Como el modelo desarrollado es para un sistema existente, la validación se obtuvo al comparar los resultados de las simulaciones, contra los datos del comportamiento del sistema real.

### **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 indicó por qué 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.

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 cuatro restantes con su planeación.

## **4 Resultados**

A continuación se describen brevemente los resultados obtenidos.

### **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.

### **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.

### **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, aún 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 incrementa 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.

### **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, aún con la demanda de servicio actual, principalmente durante el periodo de mayor actividad.

### **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.

### **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 de 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%, y 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.

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

Se estimó que si la estrategia propuesta es aplicada, es posible obtener beneficios significativos. 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. 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.

## **5 Conclusiones**

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 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 CO<sub>2</sub>. 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.



# 1 Introducción

---

## 1.1 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 México<sup>1</sup>. 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 vuelos<sup>2</sup>.

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, 2012<sup>3</sup>), por lo que la solución de este problema es innegablemente de gran importancia práctica.

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 4.2.1<sup>4</sup>). 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

---

<sup>1</sup> 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).

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

<sup>3</sup> P. 137.

<sup>4</sup> 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).

(AICM) opera independientemente; y los restantes 26 están a cargo de gobiernos estatales o municipales, o bien, son militares o privados (SCT, 2008<sup>5</sup>).

Dentro de la infraestructura aeroportuaria del país destaca el AICM<sup>6</sup>, 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 internacionales<sup>7</sup>. 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.

El desarrollo y empleo de modelos computacionales para evaluar los niveles prevalecientes 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 subsistemas<sup>8</sup> 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.

---

<sup>5</sup> P.105.

<sup>6</sup> 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 (Airports Council International, 2011).

<sup>7</sup> 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/>).

<sup>8</sup> 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.



Un prerequisite 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 de todos sus eslabones; afortunadamente los efectos en el sistema pueden examinarse a través de los modelos de simulación (Herrera, 2006<sup>9</sup>).

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) Online<sup>10</sup>, 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 (Tabla 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.

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

---

<sup>9</sup> Pp. 48-49.

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

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).

**Tabla 1.1 Escasez de estudios de simulación aeroportuaria, y de planeación y operación aeroportuaria**

Año	Término y número de documentos				
	<i>Simulation</i>	<i>Airport &amp; simulation</i>	<i>Airport &amp; planning</i>	<i>Airport &amp; operation</i>	<i>Airport &amp; planning &amp; 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#>

## 1.2 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).

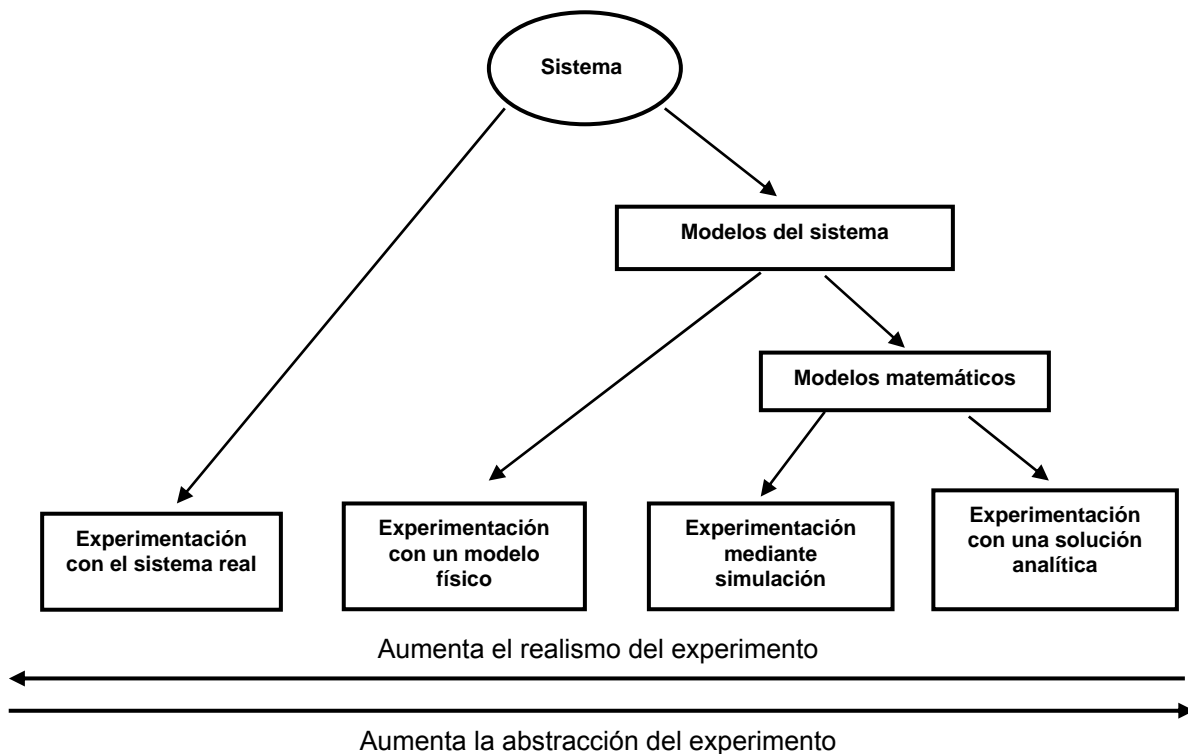
Los modelos de simulación toman comúnmente la forma de un conjunto de supuestos respecto a la operación de un sistema. Estos son expresados en forma de relaciones matemáticas y lógicas entre sus componentes. Después de que han

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.



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

**Figura 1.1 Caminos para la experimentación con un sistema**

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 horas<sup>11</sup>. Por otro lado, si se requiere, la representación del tiempo real puede ser alargada para observar con más detalle el fenómeno bajo investigación.
- e) Menores costos. Algunos autores han estimado que los estudios diseñados para estimar las características de un sistema propuesto, mediante la simulación,

---

<sup>11</sup> 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.

pueden tener un costo de un dos por ciento o menos del capital requerido para la construcción de un sistema real<sup>12</sup> (Henrisken, 1983).

f) Se obtienen respuestas a preguntas del tipo “¿qué pasa si...?” Esto es particularmente útil para el diseño de sistemas nuevos.

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

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.

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

---

<sup>12</sup> 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.

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 este trabajo,

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 Experfit<sup>13</sup>; 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 sus oficinas o en las del cliente. Dentro de todos los programas del sondeo señalado, sólo otros cuatro<sup>14</sup> 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.

### **1.3 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, 2008<sup>15</sup>), 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 m<sup>2</sup> fueron ampliados y remodelados, y en las aéreas operacionales se sumaron 129,000 m<sup>2</sup> 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 229,000 m<sup>2</sup>, que incluye salas de última espera, patio-hotel y estacionamiento cubierto, y 140,000

---

<sup>13</sup> 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).

<sup>14</sup> Todos comercializados por la empresa INCONTROL Simulation Solutions.

<sup>15</sup> P. 109.



m<sup>2</sup> de superficie exterior entre jardineras, plazas comerciales y vialidades internas. La plataforma de aviación comercial tiene una superficie total de 294,000 m<sup>2</sup>, y está conformada por 96,000 m<sup>2</sup> de concreto hidráulico en la zona de estacionamiento de aeronaves (23 posiciones fijas y siete remotas), y 198,000 m<sup>2</sup> de concreto asfáltico en las zonas de rodaje. Asimismo se construyeron 194,000 m<sup>2</sup> 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 crítico<sup>16</sup> 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, 2008<sup>17</sup>), 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 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, 2008<sup>18</sup>).

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.

---

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

<sup>17</sup> P. 109.

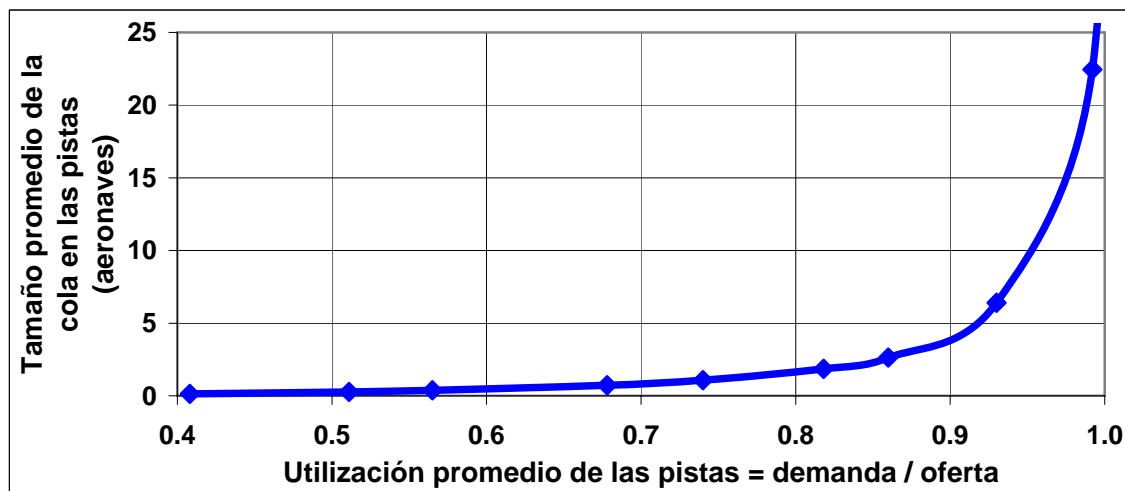
<sup>18</sup> P. 110.

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).

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).



Fuente: Herrera, 2006.

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

## **1.4 Hipótesis y objetivos**

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

### **1.4.1 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.

### **1.4.2 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.

### **1.4.3 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.



## 2 Revisión de literatura

---

En esta sección se presenta una revisión integrada y resumida de la literatura relacionada con este proyecto de investigación. 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) (Tabla 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).

**Tabla 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>

### 2.1 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 este trabajo. 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 investigación. 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.

En México, 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).

## **2.2 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 investigación. 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 estudio.

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, 2011<sup>19</sup>).

---

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



## 2.3 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 aeronave de gran capacidad, en función de la rugosidad de la pista del aeropuerto. Ninguno aborda los aspectos que se manejan en esta investigación.

## 2.4 Resumen de la revisión bibliográfica

En el Tabla 2.2 se presenta un resumen de los principales hallazgos encontrados en la revisión bibliográfica. En el último renglón de la tabla se hace una comparación con las aportaciones de este trabajo de investigación.

**Tabla 2.2 Resumen de la revisión bibliográfica de modelos de simulación aplicados a aeropuertos**

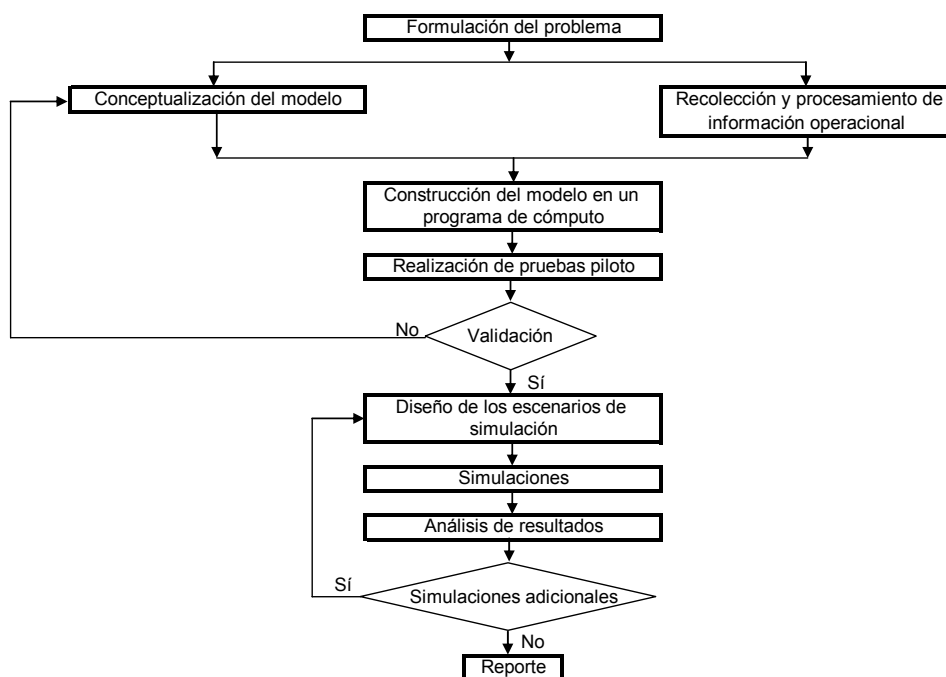
Autores	Temas		
	Planeación y operación	CTA	Aeronaves de gran capacidad
Lee, 2002.	Calles de rodaje.		
Trani y Baik, 2002.	Investigación de la automatización avanzada en la operación en tierra de las aeronaves.		
Santana y Muller, 2003.	Demoras en infraestructura.		
Wu, 2003 y 2004.	Programación de los 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.

Fuente: Elaboración propia.



## 3 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.



Fuente: Adaptado de Hillier y Lieberman, 2006; y Law y Kelton, 2006.

**Figura 3.1 Pasos para la elaboración del modelo de simulación y su aplicación**

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

### 3.1 Formulación del problema

El estudio de simulación debe iniciar con el establecimiento del problema a resolver (inciso 1.3). También, se requiere estar familiarizado profundamente con las características y propósito del sistema que va a ser modelado (incisos 3.2 y 3.3), con los escenarios que deben ser considerados (inciso 3.6) y con los objetivos del estudio (incisos 1.4.2 y 1.4.3).

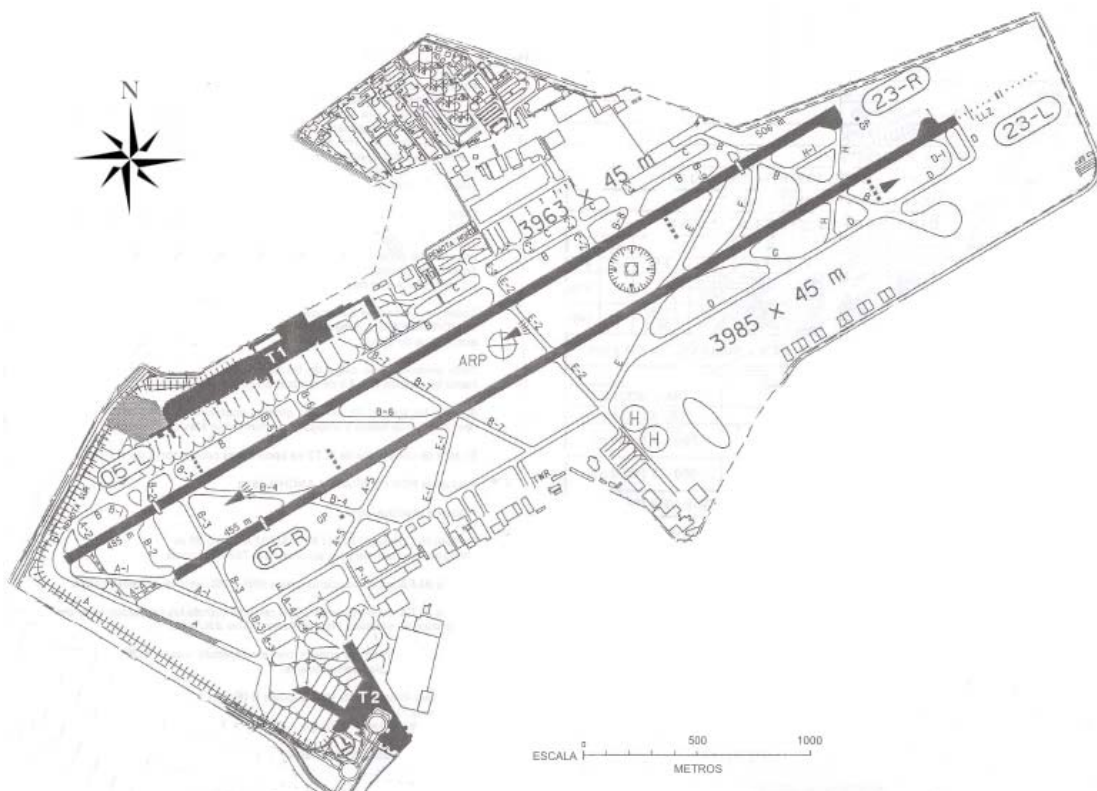
Ya en el planteamiento del problema (inciso 1.3) se señaló que la principal problemática del sistema aeroportuario nacional es la enorme demanda de servicios a atender en el AICM, por lo que es necesario construir un nuevo aeropuerto. Sin embargo, debido a que todavía no se ha definido incluso su ubicación, 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.

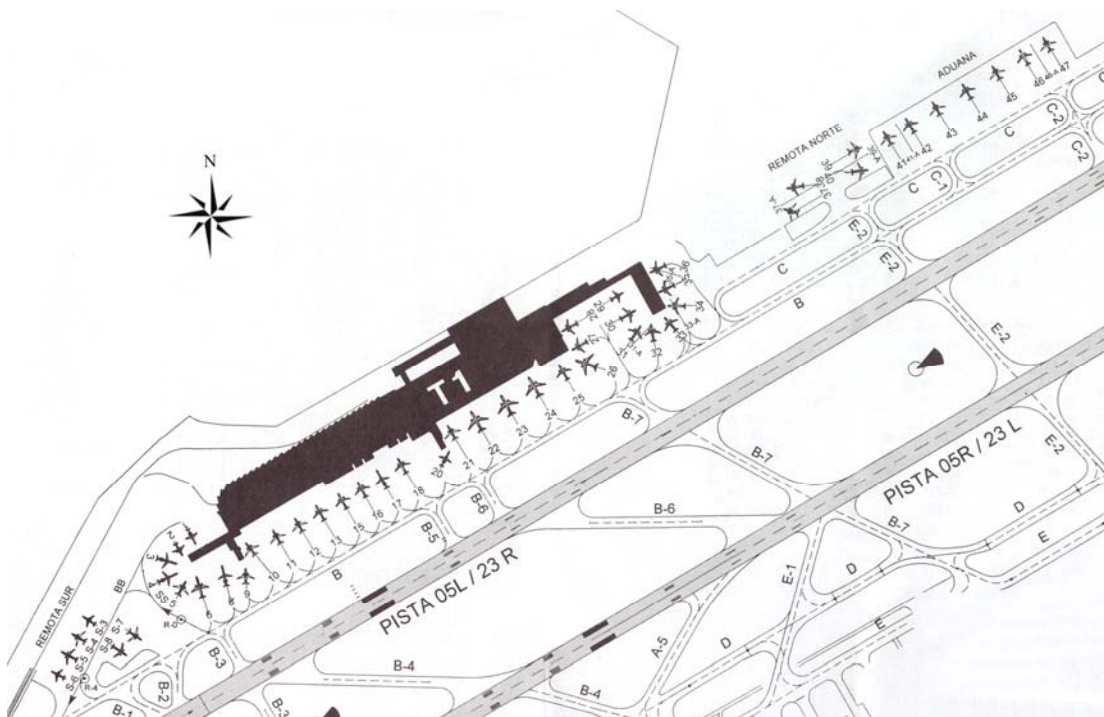
El modelo debe considerar las principales variables operativas en pistas, calles de rodaje y plataformas del AICM (Figura 3.2). Además, debe simular los despegues y aterrizajes de aeronaves en las pistas 05-L y 05-R y sus movimientos en las calles de rodaje hacia y desde las plataformas de las terminales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



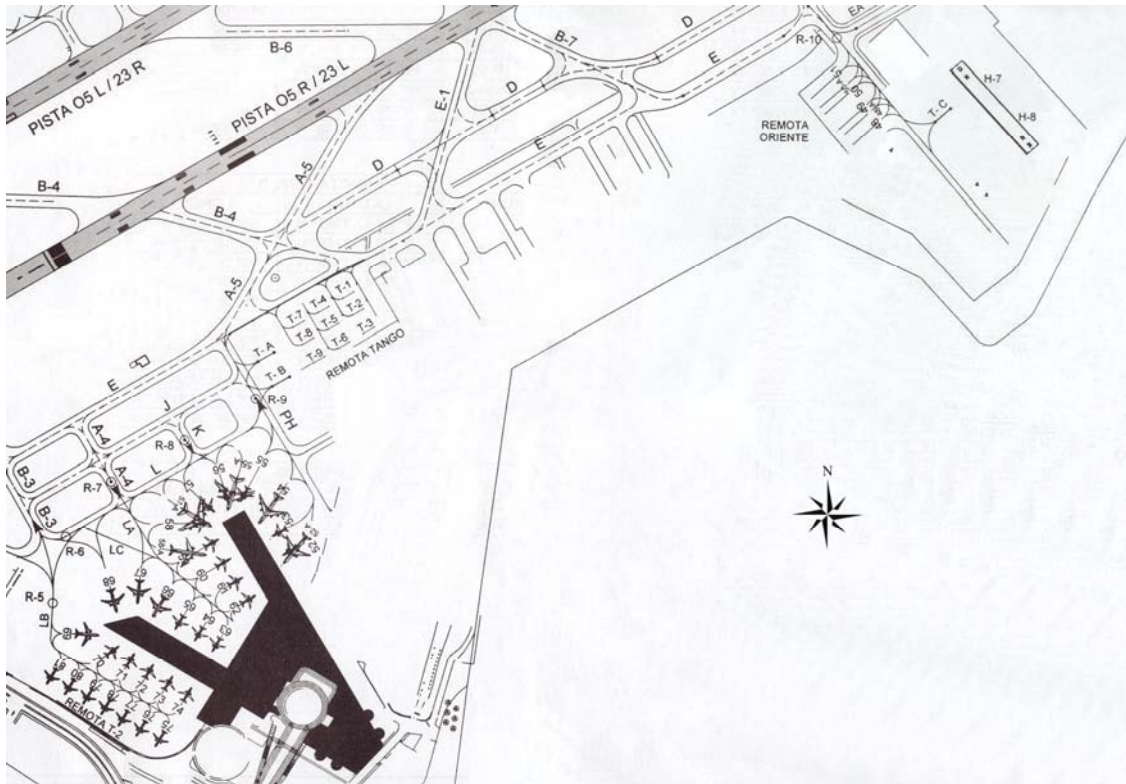
Fuente: Adaptado de SENEAM, 2011.

**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**

## **3.2 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 minuto<sup>20</sup> 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.

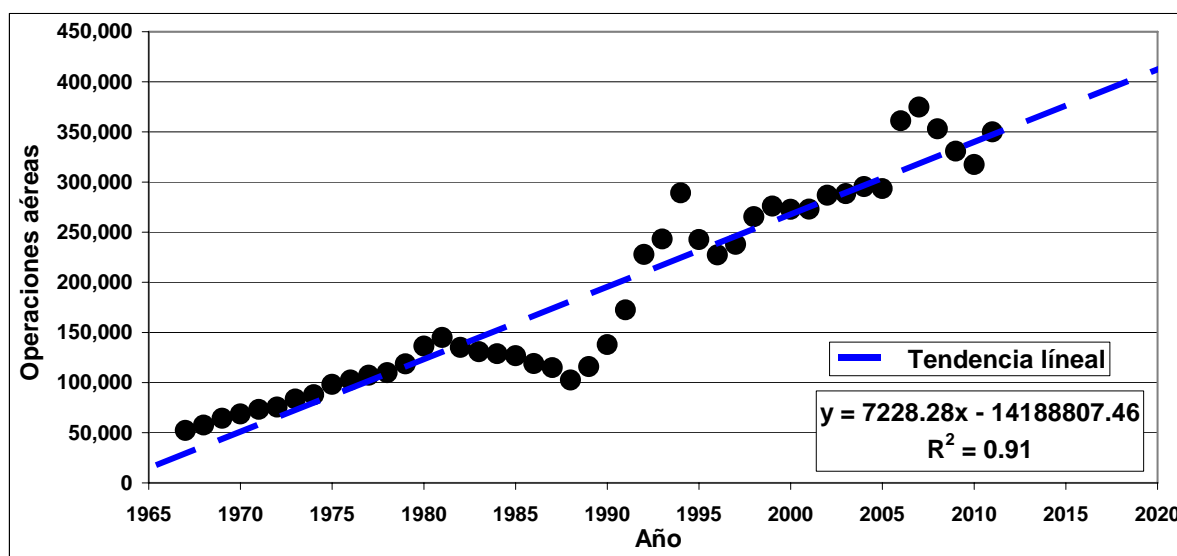
### **3.2.1 Comportamiento general de las operaciones de aeronaves**

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.

---

<sup>20</sup> 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).

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.



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

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

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).

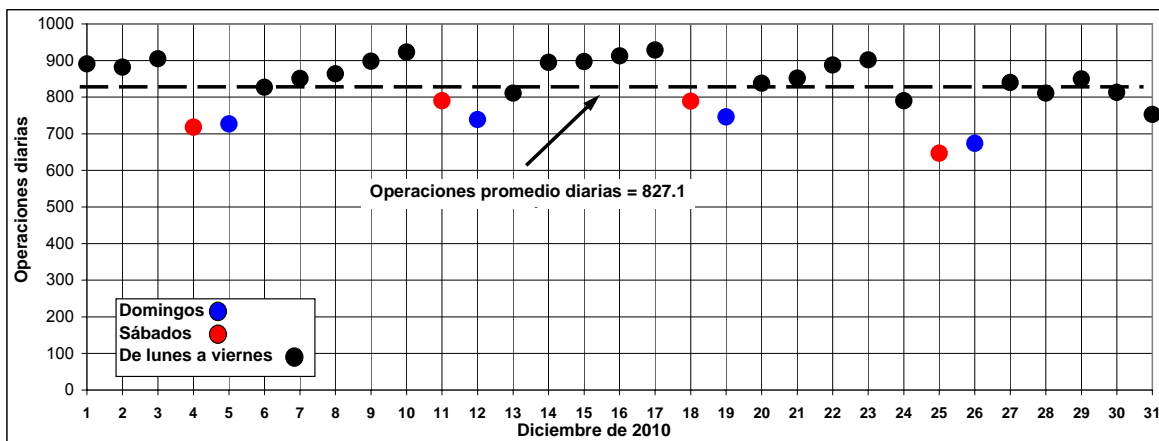
La tendencia decreciente en años recientes se asocia con la crisis económica (2008-2011) que se originó en Estados Unidos y que se propagó a varios países del mundo, incluyendo a México, debido a que dicho país es nuestro principal socio comercial. La turbulencia en los mercados financieros internacionales 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  $3.8 \times 10^{-24}$  para el coeficiente de la variable Año y de  $6.4 \times 10^{-24}$  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.

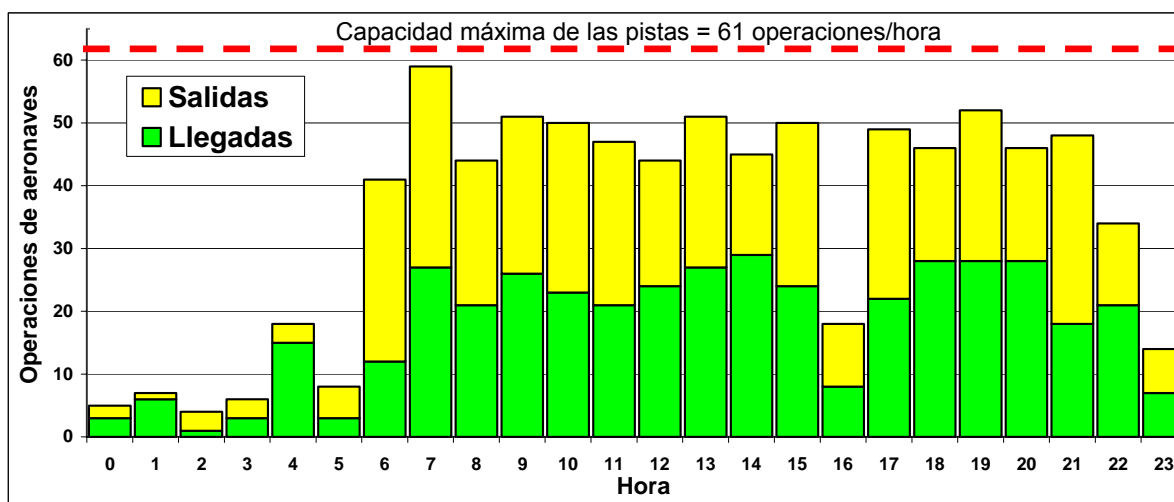


Fuente: Elaboración propia con base en información de SENEAM.

**Figura 3.6 Operaciones diarias en el AICM durante el mes de diciembre de 2010**

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 (Tabla 3.1).



Fuente: Elaboración propia con base en información de SENEAM.

**Figura 3.7 Operaciones aéreas en el AICM durante un día típico de enero de 2011**

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). 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 remotas<sup>21</sup>; y en la Terminal 2, veintisiete son de contacto y veinticuatro remotas.

**Tabla 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.

<sup>21</sup> 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.

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 la Tabla 3.2 se presenta un resumen de los tiempos de ocupación promedio de las aeronaves en las distintas plataformas y posiciones de atraque.

**Tabla 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.

### **3.2.2 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 las Tablas 3.3 y 3.4. Cabe señalar que el formato de las distribuciones en las tablas, 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.

**Tabla 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

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 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

Fuente: Elaboración propia.

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).

### **3.3 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).

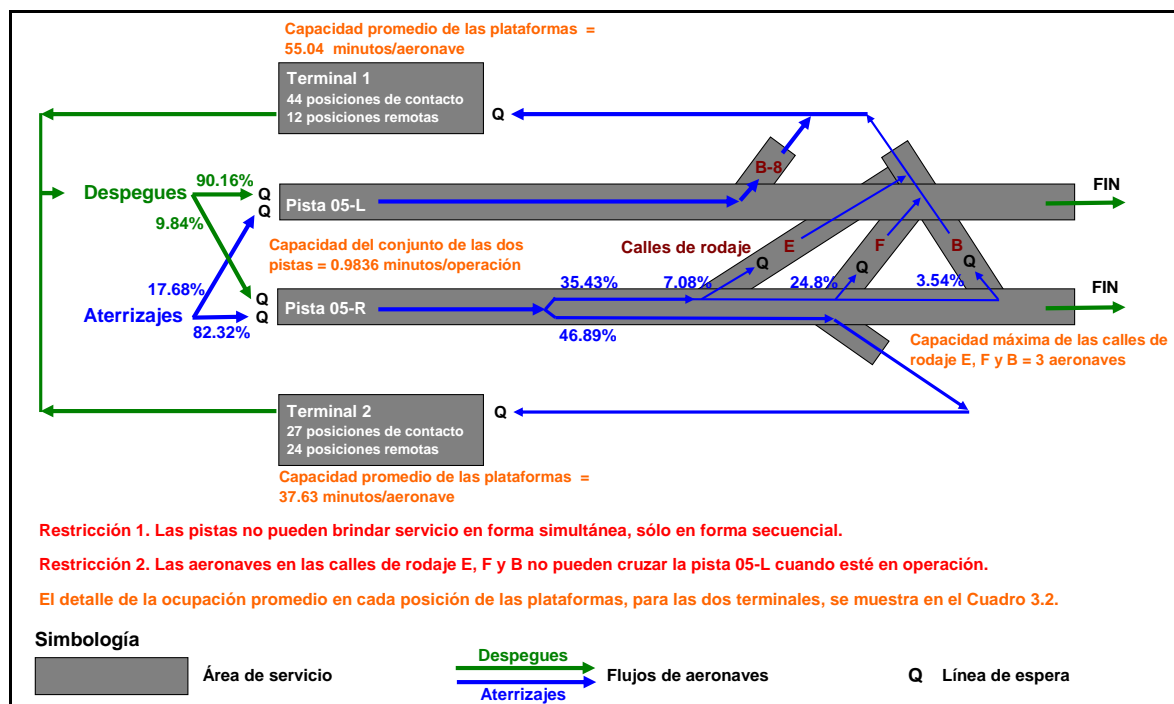
La longitud de pista requerida en los despegues depende del tipo de aeronave, generalmente despegan a la altura de la calle E-2, pero en ocasiones puede ser un poco antes, cuando se trata de una aeronave ligera o con poca carga. En cambio, una aeronave pesada, por ejemplo, un Boeing-747 que deja mayor turbulencia, despega 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 Travel<sup>22</sup>.

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.



Fuente: Elaboración propia.

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

<sup>22</sup> Información proporcionada por personal de SENEAM en entrevistas realizadas el 9 de febrero de 2011, en sus instalaciones del AICM.



### 3.4 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 cómputo<sup>23</sup>.

Para ello, las distribuciones de llegadas y salidas obtenidas en el inciso 3.2.2 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 la Tabla 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.

---

<sup>23</sup> En este trabajo fue utilizado el programa de simulación Flexsim, versión 5.

**Tabla 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 <sup>3</sup> = Velocidad promedio real/4
		km/hora	m/minuto	metros/minuto
Pistas <sup>1</sup>	Inicio de aterrizaje	220.8	3,680	920
	En el punto de rotación de la aeronave <sup>2</sup>	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 atraque	2.4	40	10

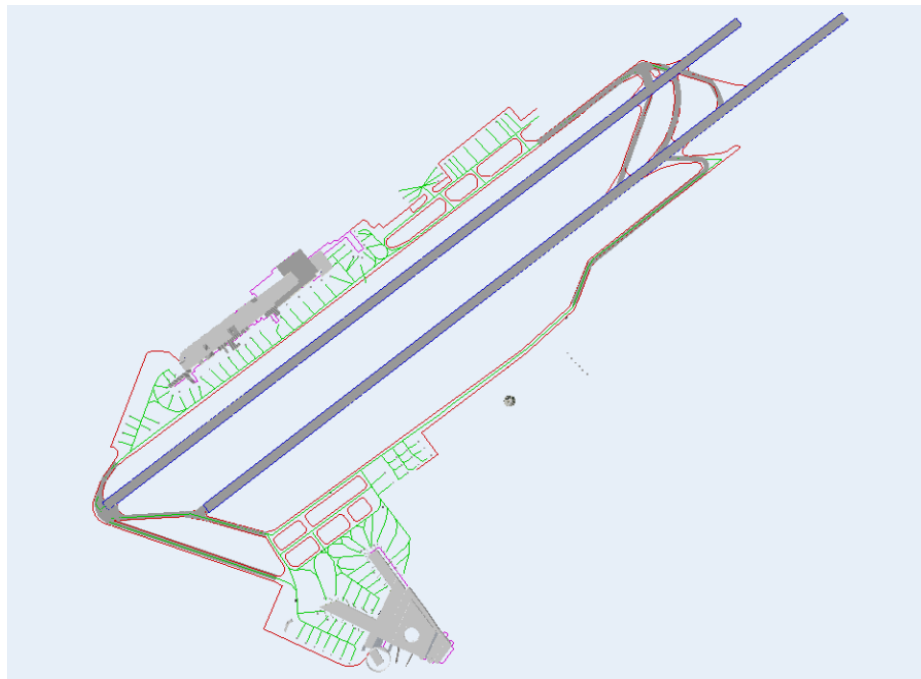
Notas:

1. Se consideraron aceleraciones para los despegues de 4,000 metros/minuto<sup>2</sup> (equivalente a 1.11 m/s<sup>2</sup>); 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/minuto<sup>2</sup> (0.277 m/s<sup>2</sup>)

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.

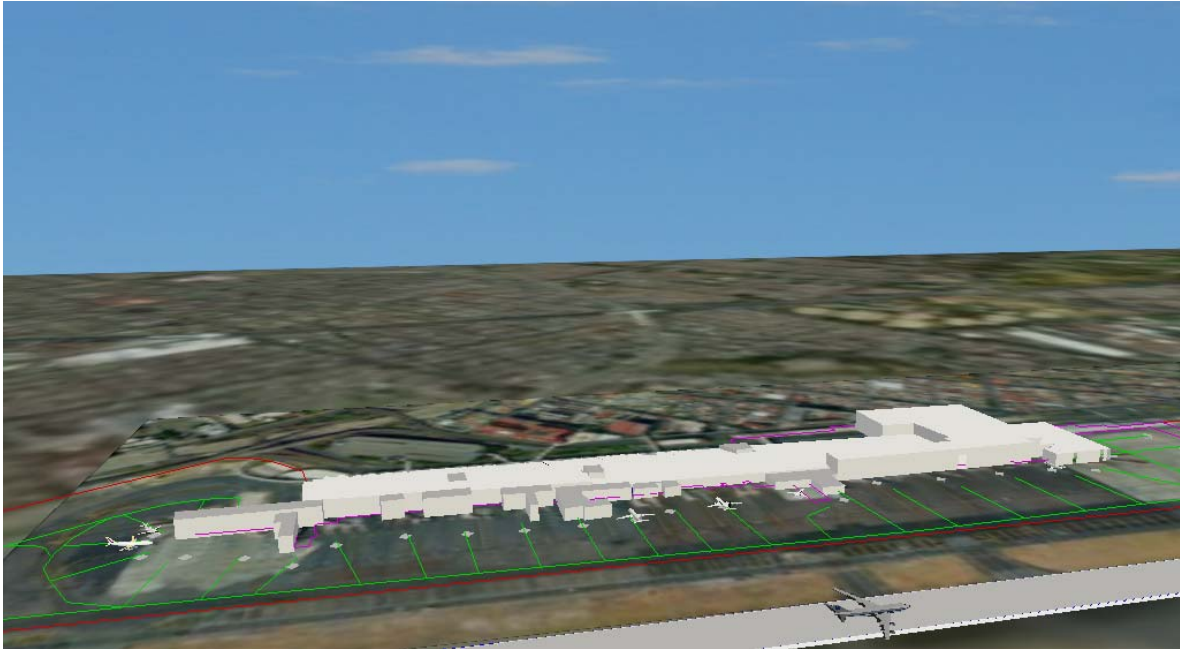
3. Las velocidades introducidas en el modelo consideran la escala utilizada. Cada unidad de longitud en el modelo representa cuatro metros.

Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.9 Vista en planta del modelo del AICM desarrollado**



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.10 Perspectiva del modelo de la Terminal 1**



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.11 Perspectiva del modelo de la Terminal 2**

### 3.5 Pruebas piloto y validación del modelo

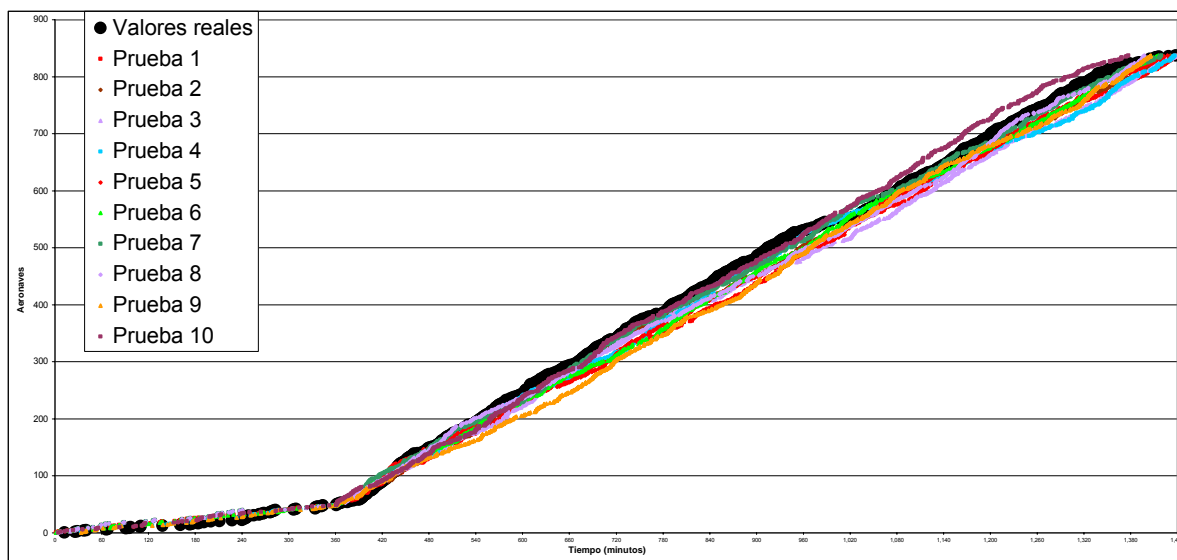
Las pruebas piloto son simulaciones que tienen como finalidad incrementar la experiencia del modelador y observar en forma preliminar los resultados de salida

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).



Fuente: Elaboración propia.

**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, la Tabla 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%.

**Tabla 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%

Fuente: Elaboración propia.

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.

### 3.6 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.

### **3.6.1 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 las Tablas 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.

**Tabla 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
<b>Intervalo entre las 00:00 y 06:00 horas:</b> Exponencial (1.525)	Diversas de las tres clases	360	236
<b>Intervalo entre las 06:00 y 24:00 horas:</b> 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

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 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
<b>Intervalo entre las 00:00 y 06:00 horas:</b> Exponencial (2.769)	Diversas de las tres clases	360	130
<b>Intervalo entre las 06:00 y 24:00 horas:</b> 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

Fuente: Elaboración propia.

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 la Tabla 3.9. Observe que en esta tabla 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 de la Tabla 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 año<sup>24</sup> en que iniciarán las afectaciones significativas, y cómo se deteriorará el servicio a partir de entonces.

**Tabla 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%

Fuente: Elaboración propia.

### 3.6.2 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 periódico<sup>25</sup>. 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 aeropuerto<sup>26</sup>. En consecuencia, durante algunos días el aeropuerto

<sup>24</sup> Aquel en donde la utilización promedio de las pistas es igual a 0.8.

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

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



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

### **3.6.3 Efectos de la presencia de condiciones ambientales adversas**

La operación del AICM puede ser afectada por condiciones ambientales adversas, como pueden ser chubascos<sup>27</sup>, niebla<sup>28</sup>, neblina<sup>29</sup> y ceniza volcánica<sup>30</sup>. 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

---

<sup>27</sup> 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/>.

<sup>28</sup> 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/>.

<sup>29</sup> 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/>.

<sup>30</sup> 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>.

neblina puede ser de hasta tres horas<sup>31</sup>. Estos tres fenómenos meteorológicos pueden reducir significativamente la visibilidad<sup>32</sup> 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 de vuelos. En las llegadas ocasionan que los vuelos sean desviados hacia aeropuertos alternos<sup>33</sup>.

En cuanto a la ceniza volcánica, ésta es riesgosa particularmente cuando está formada por partículas diminutas de entre 10 y 30  $\mu\text{m}$ , 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 vuelos<sup>34</sup>.

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

---

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

<sup>32</sup> 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/>.

<sup>33</sup> 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.

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

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 turborreactores 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.

### **3.6.4 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 cercanas<sup>35</sup>. 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.

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 patentes<sup>36</sup> 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 Fligth 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

---

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

<sup>36</sup> 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>.

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 láser<sup>37</sup>. 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 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 despega. Para ello, se considera en este

---

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



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.

### 3.6.5 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 tipos 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 configuración<sup>38</sup>.



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

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

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

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 pasajeros<sup>39</sup>.



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

**Figura 3.14 Aeronave Airbus A380**

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 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

---

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



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.

### **3.6.6 Efecto de la incorporación de infraestructura nueva**

Como se señaló en el planteamiento del problema (inciso 1.3), 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 atraque en la plataforma Remota Oriente de la Terminal 2 (ver Figura 3.4). Actualmente, esta plataforma tiene seis posiciones (ver Tabla 3.2). Para el experimento se consideró que entran

en operación otras seis, para que en total esta plataforma tenga doce posiciones de atraque. Se consideró que cada una de estas posiciones tiene una capacidad promedio para atender a cada aeronave en 42.27 minutos (ver Tabla 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 atraque. Cada punto obtenido en ambos intervalos de actividad representa el valor promedio de diez corridas de simulación.

### **3.6.7 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). 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 la Tabla 3.10.

**Tabla 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 <sup>1</sup> (dólares/s)	Número de asientos <sup>2</sup>
Learjet 24 <sup>3</sup>	0.1795	6
552 Citation II <sup>3</sup>	0.1948	8
Learjet 25 <sup>3</sup>	0.1948	8
Learjet 35 <sup>3</sup>	0.1948	8
Learjet 45 <sup>3</sup>	0.2025	9
Learjet 60 <sup>3</sup>	0.2102	10
North American NA-265 Sabreliner 40 <sup>3</sup>	0.2179	11
Gulfstream II and III <sup>3</sup>	0.2794	19
Swearingen SA-226TB <sup>3</sup>	0.2794	19
De Havilland Canada DHC-6 Twin Otter	0.2948	21
IAI Arava <sup>3</sup>	0.3178	24
Dornier 328 <sup>3</sup>	0.3639	30
De Havilland Canada DHC-8-200 Dash	0.4331	39
CASA/IPTN CN-235 <sup>3</sup>	0.4716	44
ATR-42	0.5149	48
Antonov AN-32 <sup>3</sup>	0.5177	50
Bombardier CRJ100 and 200 <sup>3</sup>	0.5177	50
Embraer ERJ-145 <sup>3</sup>	0.5177	50
IL-18 <sup>3</sup>	0.8252	90
Embraer EMB-190 <sup>3</sup>	0.8867	98
Airbus 319 <sup>3</sup>	1.1634	134
Boeing 737 <sup>3</sup>	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 <sup>3</sup>	1.4939	177
DC-8-72 <sup>3</sup>	1.8245	220
Boeing 767-300	1.8489	269
Boeing 767-200 <sup>3</sup>	1.8552	224
Airbus 300	2.3642	266
Boeing 777-200	2.4152	400
MD-11 <sup>3</sup>	2.6163	323
Airbus 340-300 <sup>3</sup>	2.7085	335
Airbus 340-640 <sup>3</sup>	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.

Fuente: Elaboración propia.

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 aeronaves<sup>40</sup>. 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  $1.5361 \times 10^{-6}$ .

---

<sup>40</sup> Se obtuvo un coeficiente de determinación  $R^2 = 0.8176$ .

## 4 Resultados y discusión

---

En este capítulo se describen brevemente los resultados obtenidos al aplicar el modelo de simulación desarrollado a los escenarios planteados en los incisos 3.6.1 a 3.6.7, y se presenta su discusión respectiva. Dependiendo de la naturaleza de los resultados, estos se agruparon en tablas 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.

### 4.1 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.

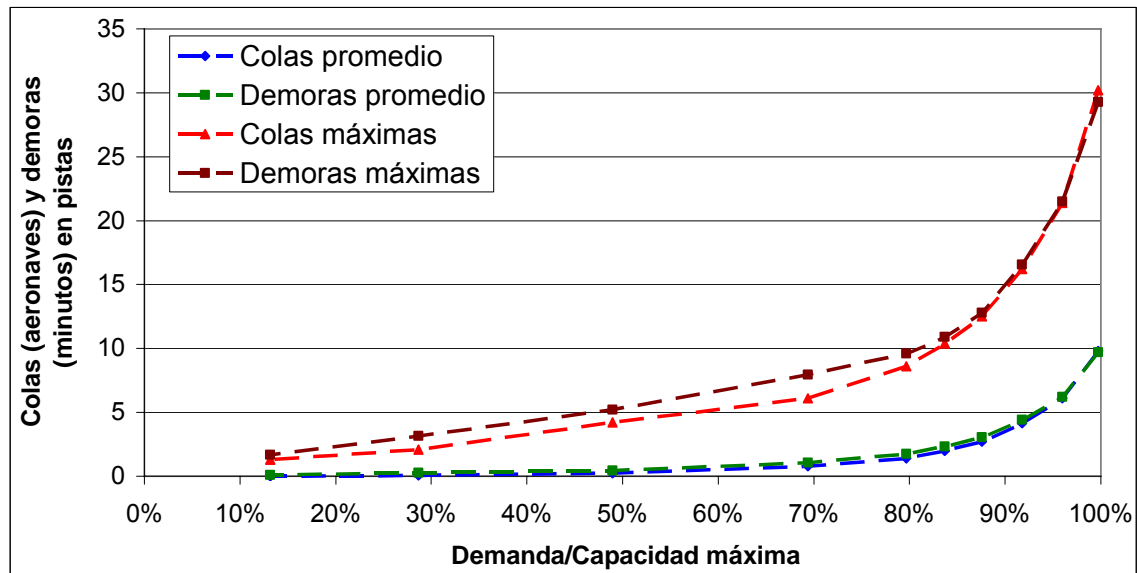
Se observó que el periodo más problemático es entre las 06:00 y 24:00 horas, dado que en éste se presentan las mayores magnitudes de colas y demoras en las pistas, tanto en los valores promedio, como en los máximos. Mientras que en el periodo de menor actividad se alcanzan valores de 10 y 30 unidades (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%.

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 la Tabla 3.9.



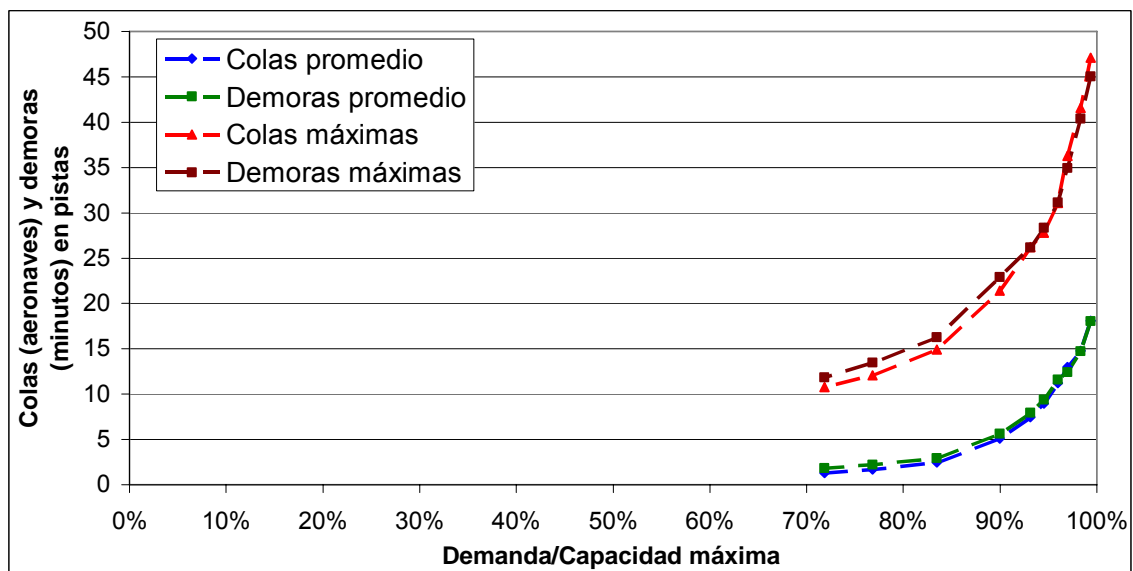
Nota 1: Cada punto representa el valor promedio de diez corridas de simulación.

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.

Fuente: Elaboración propia.

**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.

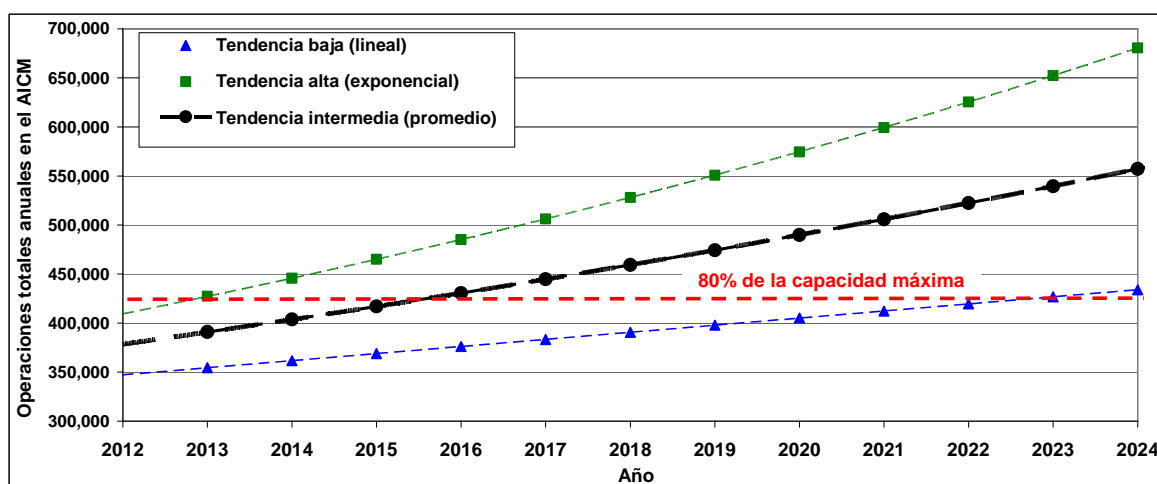
Nota 3: La capacidad máxima está referida al intervalo de dieciocho horas, por lo que su valor corresponde a 1,098 operaciones.

Fuente: Elaboración propia.

**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**

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 minutos<sup>41</sup>. 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).



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  $6.4 \times 10^{-24}$ ), 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.

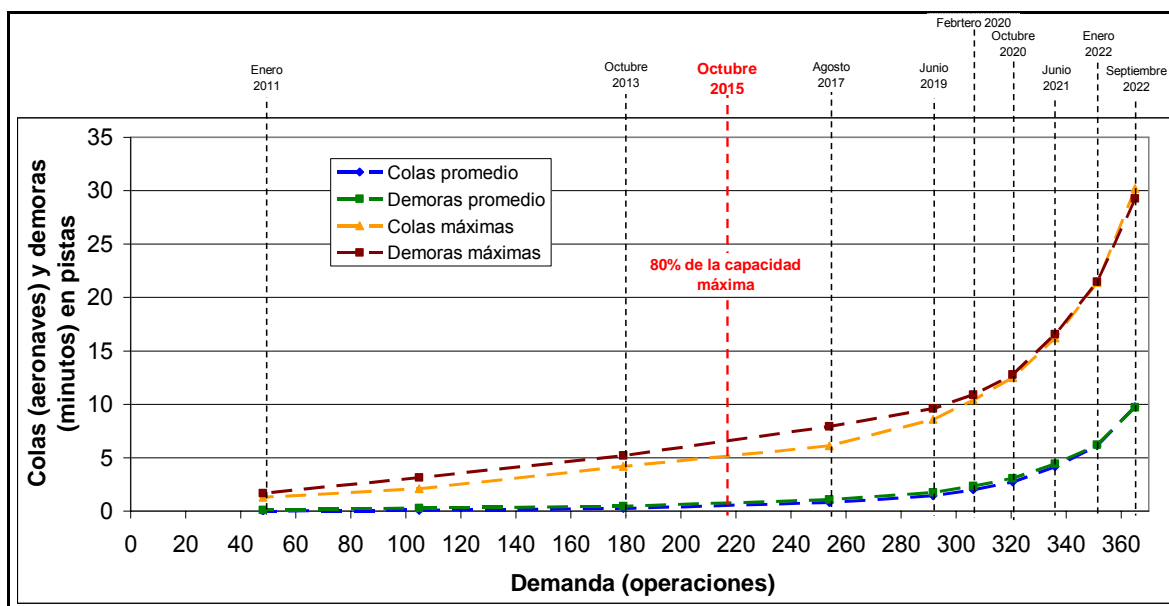
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 4.3 Pronóstico de las operaciones totales anuales en el AICM**

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

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 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.

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.



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.

Fuente: Elaboración propia.

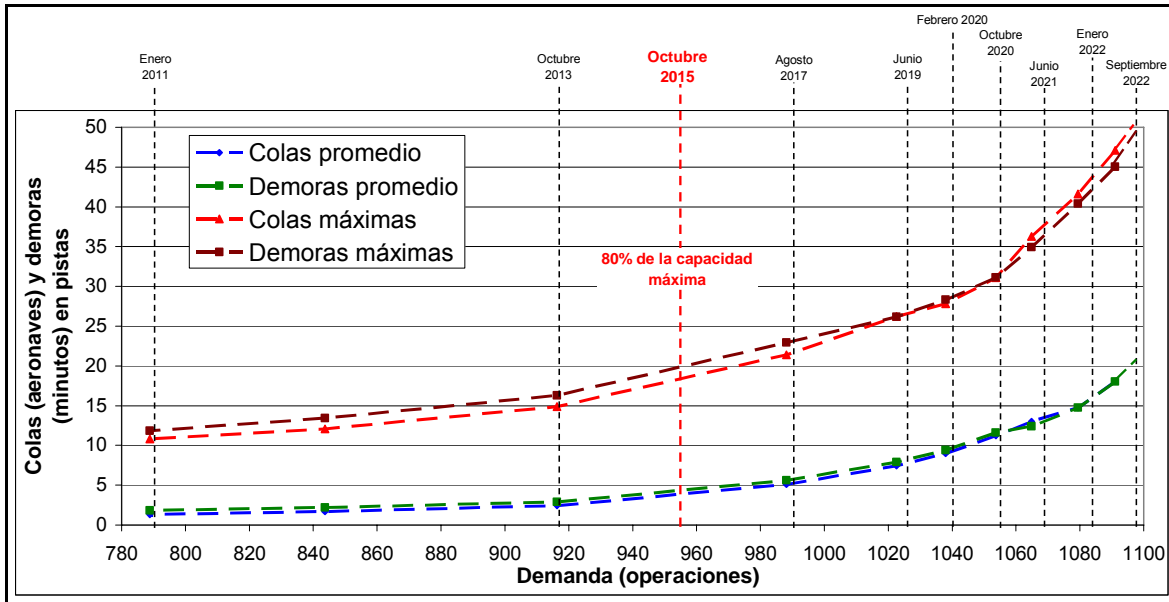
**Figura 4.4 Evolución del deterioro de servicio en el AICM durante el intervalo entre las 00:00 y 06:00 horas**

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.



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.

Fuente: Elaboración propia.

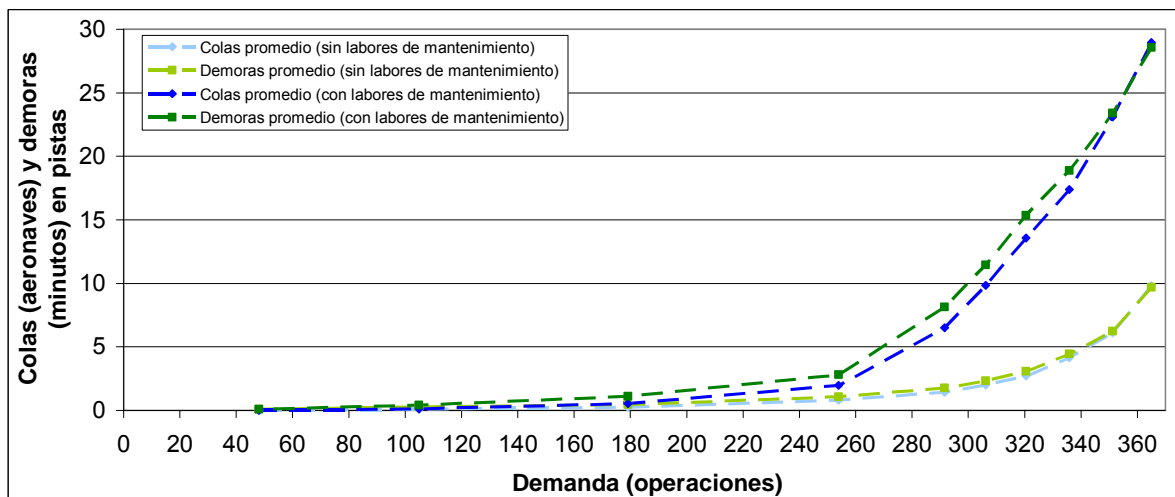
**Figura 4.5 Evolución del deterioro de servicio en el AICM durante el intervalo entre las 06:00 y 24:00 horas**

## 4.2 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.

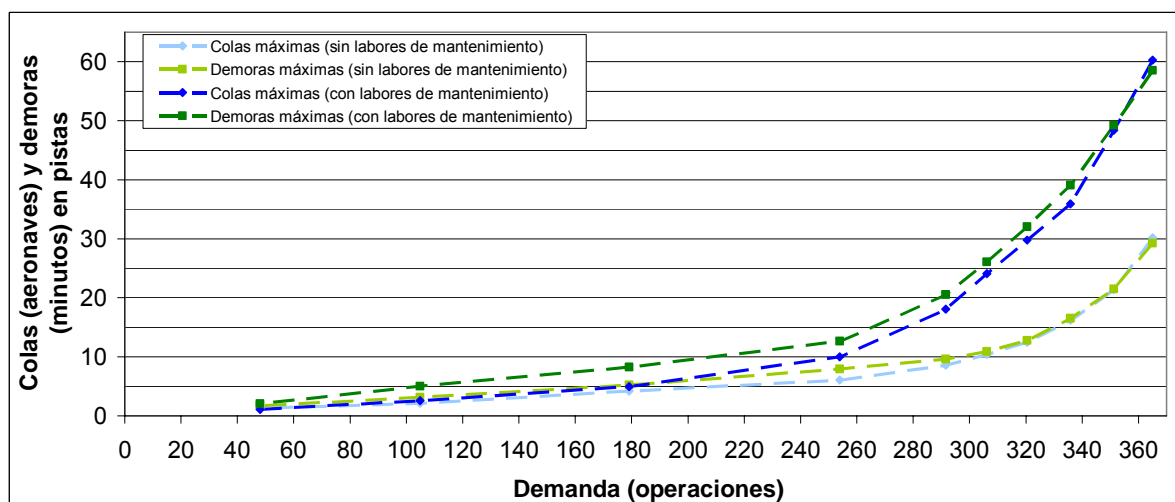
Las Figuras 4.6 y 4.7 corresponden al intervalo entre las 00:00 y 06:00 horas, en la primera se comparan los valores promedio y en la segunda los valores máximos, tanto de líneas de espera como de demoras. Cada punto representa el promedio de diez corridas de simulación y las líneas punteadas la tendencia 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.



Fuente: Elaboración propia.

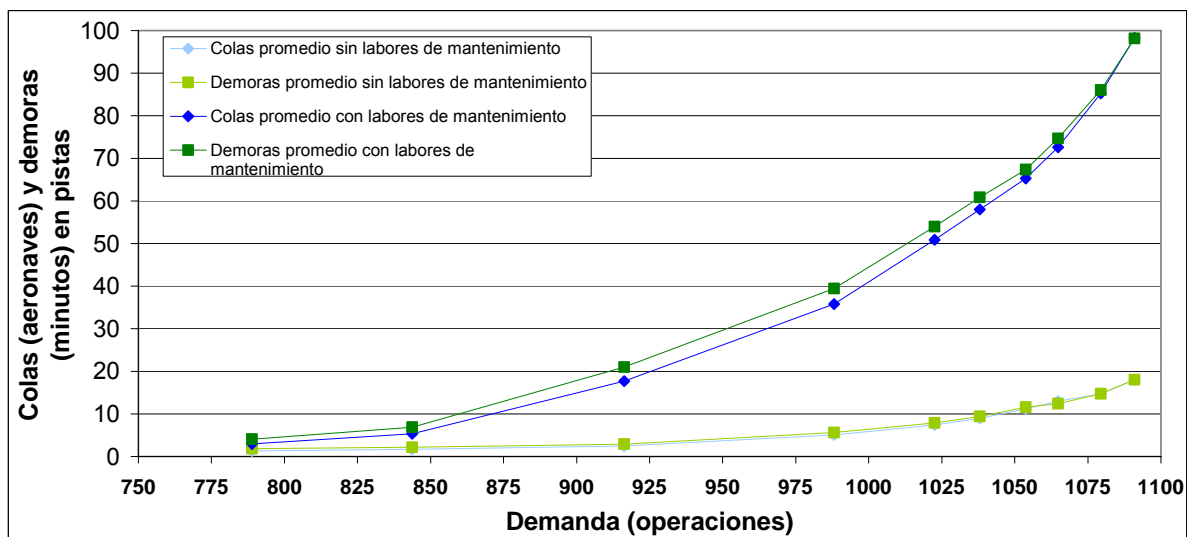
**Figura 4.6 Comparativo del deterioro de servicio (colas y demoras promedio) en el AICM, derivado de las labores de mantenimiento en sus pistas, cuando se realizan durante el intervalo entre las 00:00 y 06:00 horas**



Fuente: Elaboración propia.

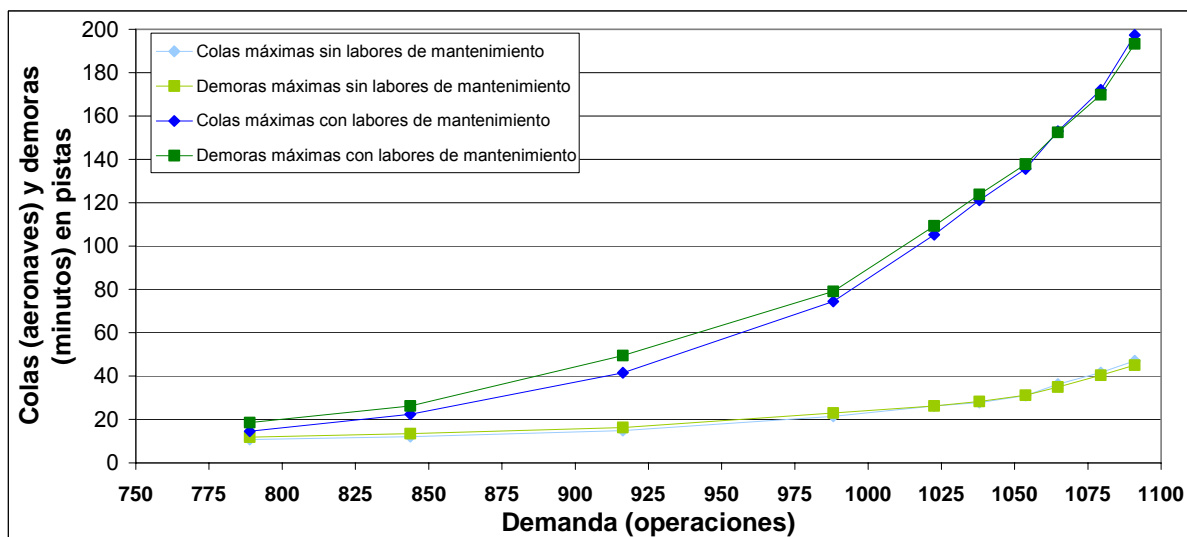
**Figura 4.7 Comparativo del deterioro de servicio (colas y demoras máximas) en el AICM, derivado de las labores de mantenimiento en sus pistas, cuando se realizan durante el intervalo entre las 00:00 y 06:00 horas**

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.



Fuente: Elaboración propia.

**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**



Fuente: Elaboración propia.

**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**

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.

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.

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.

### **4.3 Escenario para estimar los efectos de la presencia de condiciones ambientales adversas**

Los resultados del modelo de simulación<sup>42</sup>, 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 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 la Tabla 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

---

<sup>42</sup> Con base en diez corridas de simulación.

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.

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

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

Fuente: Elaboración propia.

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 estimó<sup>43</sup> 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 la Tabla 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.

<sup>43</sup> Con base en diez corridas de simulación.

**Tabla 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

Fuente: Elaboración propia.

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 más<sup>44</sup>.

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.

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

<sup>44</sup> 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.

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 3.6.3).

#### 4.4 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 la Tabla 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.

**Tabla 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**

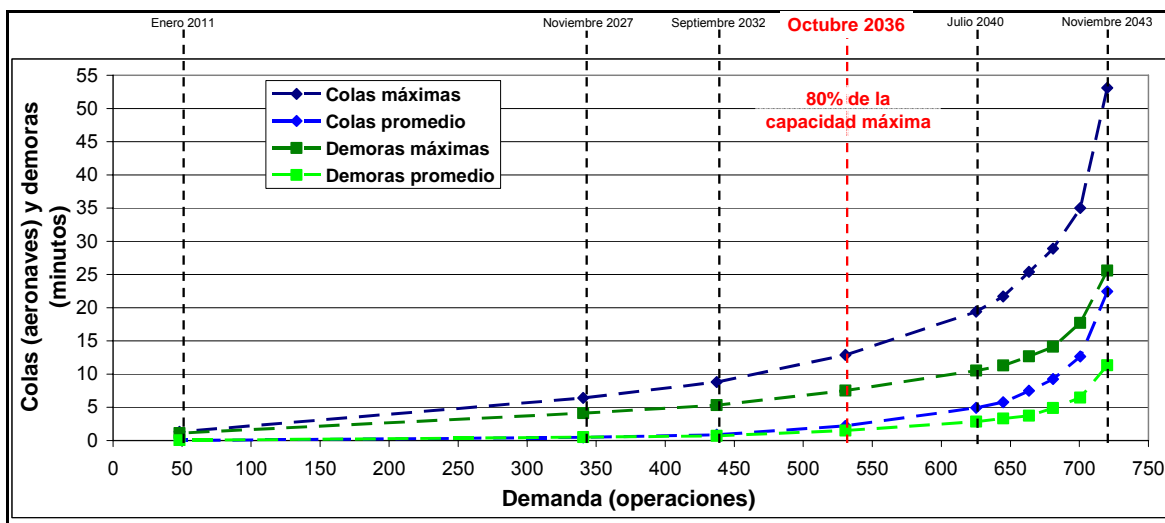
Actividad entre las 00:00 y 06:00 horas				Actividad entre las 06:00 y 24:00 horas				Actividad entre las 00:00 y 24:00 horas	
Aterrizajes	Despegues	Aterrizajes y despegues	Porcentaje de la capacidad máxima	Aterrizajes	Despegues	Aterrizajes y despegues	Porcentaje de la capacidad máxima	Operaciones totales	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%

Fuente: Elaboración propia.

Con base en la tabla 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 la Tabla 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 fechas<sup>45</sup> en las que se alcanzarían diferentes niveles de demanda<sup>46</sup>, remarcando el caso cuando se inicia la saturación en pistas<sup>47</sup>, todas referidas a una operación diaria de 24 horas.



Fuente: Elaboración propia.

**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**

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 4.1, en donde para la capacidad actual de las pistas, éste inicia su saturación en el año

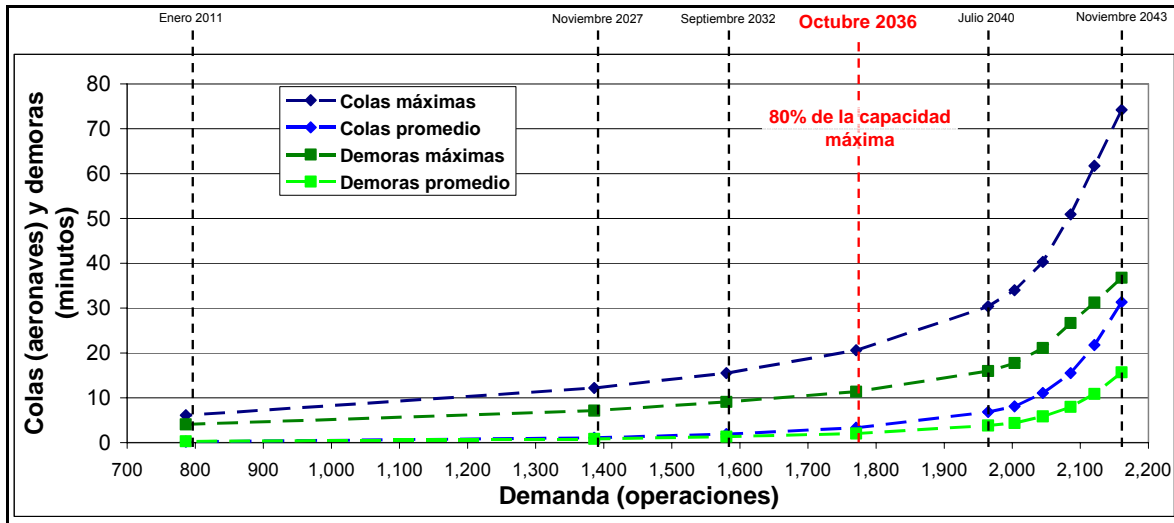
<sup>45</sup> Con base en una tendencia de crecimiento intermedia, ver inciso 4.1.

<sup>46</sup> 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.

<sup>47</sup> Cuando alcanzan el 80% de su capacidad máxima.



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.



Fuente: Elaboración propia.

**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 prevalecientes 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.

## 4.5 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 la Tabla 4.4. En esta misma tabla, 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.

**Tabla 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.**

<b>Cuando están en operación las aeronaves ATR 42 (condición original)</b>					
	Operaciones totales	Líneas de espera (aeronaves)		Demoras (minutos)	
		Máxima	Promedio	Máxima	Promedio
	788.90	10.80	1.32	11.86	1.82
<b>Cuando están en operación las aeronaves ATR 72 en sustitución de las ATR 42</b>					
	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%

Fuente: Elaboración propia.

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 las Tablas 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.

**Tabla 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.**

<b>Cuando están en operación las aeronaves pesadas (condición original)</b>					
	Operaciones totales	Líneas de espera (aeronaves)		Demoras (minutos)	
		Máxima	Promedio	Máxima	Promedio
	48.10	1.00	0.14	2.88	0.87
<b>Cuando están en operación las aeronaves A380 en sustitución de las pesadas</b>					
	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%

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 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.**

<b>Cuando están en operación las aeronaves pesadas (condición original)</b>					
	Operaciones totales	Líneas de espera (aeronaves)		Demoras (minutos)	
		Máxima	Promedio	Máxima	Promedio
	788.90	10.80	1.32	11.86	1.82
<b>Cuando están en operación las aeronaves A380 en sustitución de las pesadas</b>					
	Operaciones totales	Líneas de espera (aeronaves)		Demoras (minutos)	
		Máxima	Promedio	Máxima	Promedio
	767.70	9.80	1.15	11.57	1.64
Reducción comparativa	21.20	1.00	0.17	0.29	0.18
	2.69%	9.26%	12.74%	2.44%	10.06%

Fuente: Elaboración propia.

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.

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.

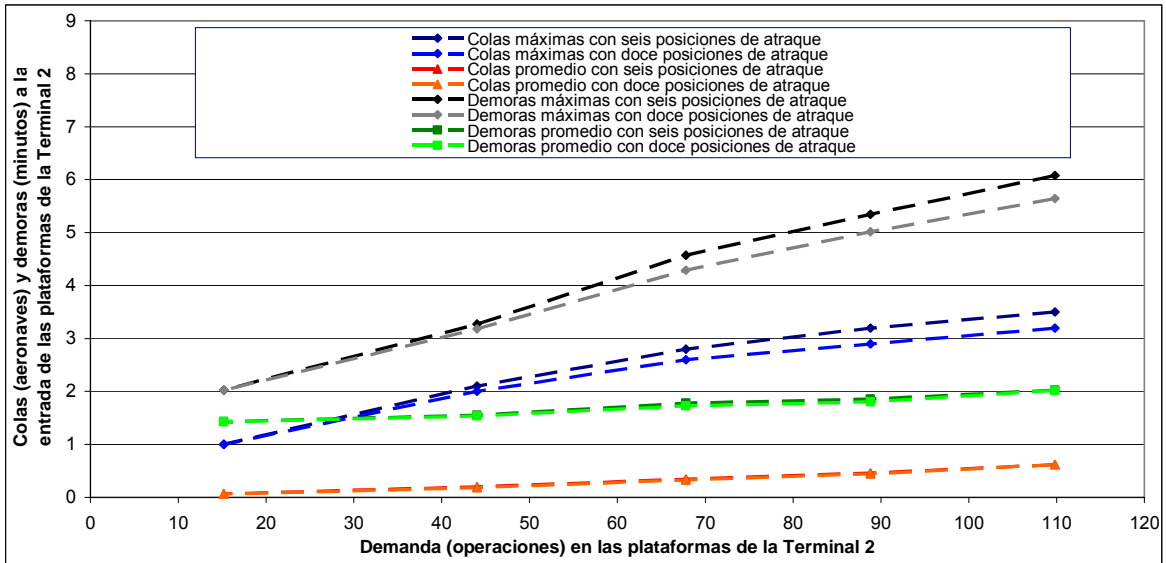
## **4.6 Escenario para cuantificar el efecto de la incorporación de infraestructura nueva**

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.

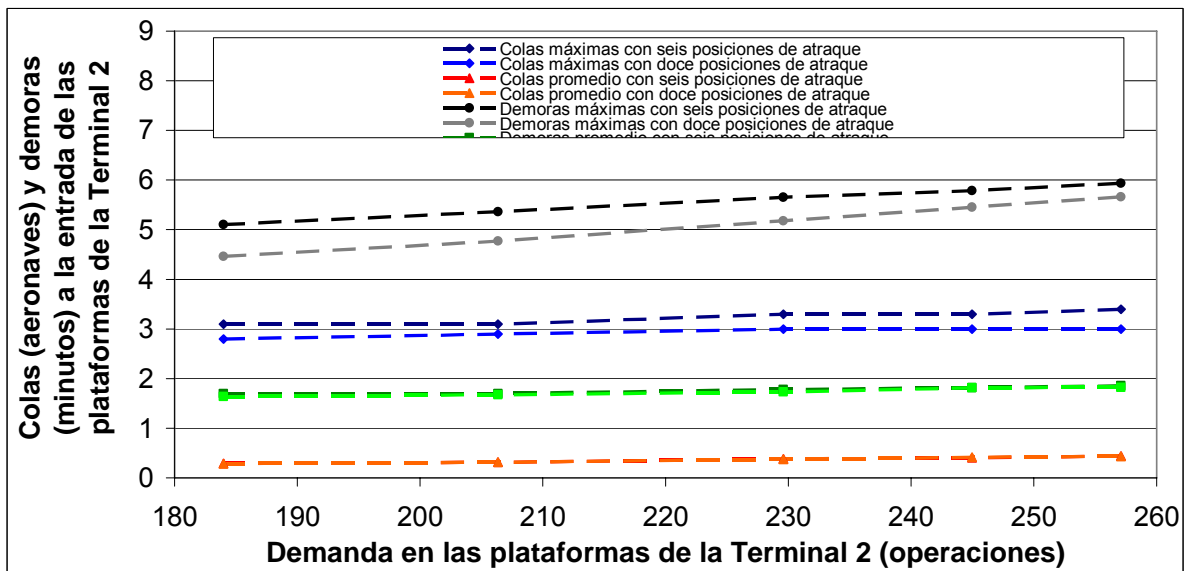
En cuanto a las tendencias del comportamiento de la mejora en el servicio, se observó que en el intervalo entre las 00:00 y 06:00 horas, los beneficios para los valores máximos se incrementan conforme aumenta la demanda (líneas divergentes); en cambio, para el intervalo entre las 06:00 y 24:00 horas, 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 superponen.



Fuente: Elaboración propia.

**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.



Fuente: Elaboración propia.

**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 atraque 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.

## **4.7 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 pesos<sup>48</sup> (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 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 1.3), 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

---

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

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 actualizar<sup>49</sup> al 2010 el valor estimado por Alberro-Semerena (2008). Utilizando este valor, el beneficio anual derivado de la reducción en las 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/hora<sup>50</sup>, 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.

---

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

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



## 5 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 CO<sub>2</sub>. 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 incrementa 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.

## 6 Bibliografía

---

**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.

**Henricken, 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](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](http://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](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.





**CIUDAD DE MÉXICO**

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

**SANFANDILA**

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



**INSTITUTO  
MEXICANO DEL  
TRANSPORTE**

**SCT**



SECRETARÍA DE  
COMUNICACIONES  
Y TRANSPORTES

[www.imt.mx](http://www.imt.mx)  
[publicaciones@imt.mx](mailto:publicaciones@imt.mx)