



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CHIHUAHUA

Ing. Aeronáutica

Materia:

Operaciones aeroportuarias

**Simulación de operación aeroportuaria del Aeropuerto Internacional de Ciudad
de México**

Docente:

Andrés Hidalgo

Alumnos:

Francisco Javier Tamez Rentería

Matricula:

20110063

Grupo:

A81M

Chihuahua, Chih., a 22 / 08 / 2023

ÍNDICE

1. Introducción a los modelos de simulación.....	1
1.1. Ventajas y desventajas de la simulación.....	1
1.2. Sistemas, modelos y tipos de modelos de simulación.....	2
1.3. Planeación para la elaboración del modelo de simulación y su experimentación.....	3
2. Formulación del problema y conceptualización del modelo.....	5
2.1. Formulación del problema.....	5
2.2. Objetivos.....	6
2.3. Datos y características generales del Aeropuerto seleccionado.....	6
2.4. Aspectos generales sobre el control de tránsito aéreo.....	8
2.5. Conceptualización del modelo.....	11
3. Información estadística de las operaciones de despegue y aterrizaje en el Aeropuerto seleccionado.....	13
3.1. Comportamiento general de las operaciones de aterrizaje y despegue en el Aeropuerto seleccionado.....	13
3.2. Distribuciones empíricas y pruebas de bondad de ajuste para las tasas de llegada y salida de aeronaves.....	20
4. Desarrollo del modelo en un programa de computadora, validación y verificación.....	23
4.1. Selección del programa de simulación.....	23
4.2. Construcción del modelo de simulación.....	24
4.3. Simulación de operaciones aeroportuarias.....	27
5. Consideraciones generales.....	34
5.1. Efectos del incremento de las operaciones del aeropuerto, como una consecuencia natural del aumento de la demanda de este tipo de servicio.....	34
5.2. Efectos del aumento de la capacidad de las pistas del aeropuerto.....	35
5.3. Efectos de la reducción de la capacidad del aeropuerto, debido a labores de mantenimiento en sus pistas.....	41

5.4. Efectos originados al reducirse la demanda de servicio, debido a la utilización de aeronaves de mayor capacidad.....	44
5.5. Comentarios finales sobre los experimentos realizados.....	46
6. Variante del modelo de simulación, para el análisis de las operaciones por tipo de vuelo nacional o internacional.....	50
6.1. Formulación del problema y conceptualización del modelo.....	50
6.2. Construcción, validación y verificación del modelo de simulación.....	53
6.3. Efectos de la operación de sólo vuelos internacionales en el aeropuerto seleccionado.....	58
6.4. Efectos de la operación de sólo vuelos nacionales en el aeropuerto seleccionado.....	59
7. Conclusiones y recomendaciones.....	61

1. Introducción a los modelos de simulación.

En esta sección se abordarán algunos conceptos elementales para la comprensión del tema, se indican las principales ventajas y desventajas de los modelos de simulación y su clasificación. Uno de los puntos más importantes de este apartado es la planeación y el establecimiento de los pasos a seguir para realizar un estudio de simulación, ya que esto será la base para el desarrollo de dicho simulacro.

1.1. Ventajas y desventajas de la simulación.

Algunas de las ventajas de la experimentación mediante modelos de simulación son:

- No necesita la interrupción de la operación del sistema real.
- Se puede aplicar a sistemas no existentes.
- Se puede acortar o alargar la representación del tiempo real.
- No requiere un gran nivel de sofisticación matemática en comparación con la modelación utilizada en soluciones analíticas y generalmente tiene un costo mucho menor que la experimentación con un sistema real.

Sin embargo, la simulación también está sujeta a importantes desventajas, entre ellas están las siguientes:

- Falta de obtención de resultados exactos.
- La simulación sólo proporciona estimaciones, no resultados exactos.
- No es una técnica de optimización.

La simulación es una técnica de evaluación utilizada para responder a preguntas del tipo “¿qué pasa si...?”, pero no para preguntas de “¿qué es lo

mejor?” La simulación no genera soluciones, sino que evalúa aquellas que se han propuesto.

1.2. Sistemas, modelos y tipos de modelos de simulación.

Los modelos pueden clasificarse como modelos físicos y como modelos matemáticos. Un modelo matemático utiliza una notación simbólica y ecuaciones matemáticas para representar a un sistema. Los modelos de simulación son un tipo particular de modelo matemático de los sistemas.

Los modelos de simulación pueden ser clasificados de acuerdo con ciertas características implícitas de ellos. Con respecto al tiempo se clasifican como estáticos o dinámicos; en función de la incertidumbre como determinísticos o estocásticos; y con respecto a las características de sus variables, como discretos o continuos.

Los modelos de simulación estáticos, también conocidos como tipo Monte Carlo, representan a sistemas en un instante particular de tiempo, o a sistemas a los que el tiempo no los afecta. Los modelos de simulación dinámicos representan a sistemas que cambian a través del tiempo. La simulación de las operaciones de despegue y aterrizaje en un aeropuerto a lo largo de un día, es un ejemplo de una simulación dinámica.

Los modelos de simulación que no tienen variables aleatorias están clasificados como determinísticos. Por ejemplo, si en un consultorio médico todos los pacientes llegan a la hora programada de su cita, se presentan tiempos de llegadas determinísticos. Por el contrario, los modelos de simulación estocásticos tienen una o más variables de entrada aleatorias, cabe señalar que las variables de entrada aleatorias producen variables de salida aleatorias.

Un modelo de simulación discreto es aquel en el cual las variables de estado cambian únicamente en instantes dados. En cambio, en un modelo de simulación continuo las variables de estado cambian continuamente a través del tiempo.

1.3. Planeación para la elaboración del modelo de simulación y su experimentación.

Hay una secuencia de pasos que deben seguirse para la elaboración del modelo de simulación y para la realización de los experimentos con él:

1.- Formulación del problema: Cualquier estudio de simulación debe iniciar con el establecimiento del problema a resolver. El diseñador del modelo debe familiarizarse profundamente con las características y propósito del sistema que va a ser modelado, con las alternativas que deben ser consideradas y con los objetivos del estudio de simulación. Los objetivos indicarán las preguntas que deben responderse mediante la simulación.

2.- Conceptualización del modelo: Es recomendable empezar con un modelo simple para después modificarlo hasta uno de mayor complejidad. Sin embargo, la complejidad del modelo final no debe exceder los requerimientos que cumplan con el propósito para el cual se está haciendo el diseño. En esta etapa debe definirse qué aspectos del sistema serán representados en el modelo y cuáles no, además, se deberá establecer con qué nivel de detalle se hará dicha representación.

3.- Recolección y procesamiento de datos tomados de la realidad: Los objetivos del estudio establecen, en gran medida, la clase de datos que deben ser obtenidos. Los datos pueden ser obtenidos de observaciones de un sistema ya existente. En el caso de un sistema inexistente los datos deben ser estimados. Mediante estos datos se obtendrán los valores de los parámetros, que serán utilizados durante la programación del modelo de simulación.

4.- Construcción del modelo en un programa de computadora: En esta etapa, el modelo conceptual especificado en el paso 2 debe ser codificado en un formato que sea reconocido por una computadora. La formulación de la codificación requiere definir dos aspectos importantes: (a) el programa de computación que será utilizado y (b) la información de entrada y condiciones iniciales. En cuanto a los datos de entrada y las condiciones iniciales, es necesario determinar los valores que se van a asignar a las variables y

parámetros del modelo en el momento del inicio, para lo cual es necesario recurrir a los supuestos del modelo conceptual y a métodos de ensayo y error.

5.- Realización de pruebas piloto: Las pruebas piloto son simulaciones realizadas con el modelo, que tienen como finalidad incrementar la experiencia del modelador con la utilización del modelo diseñado y para 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, durante la experimentación con el modelo final. Por último, estos resultados pueden ser utilizados para ayudar a la validación del modelo de un sistema ya existente.

6.- Validación y verificación del modelo: Se dice que un modelo es válido si representa adecuadamente al sistema que está siendo modelado. Por otro lado, el propósito de la verificación del modelo es asegurar que el modelo conceptual está reflejado con precisión en su representación computarizada. Se dice que verificar es construir correctamente el modelo, mientras que validar es construir el modelo correcto.

7.- Diseño de los experimentos de simulación: En este paso se planean los experimentos que se harán mediante el modelo de simulación establecido. Algunos de los aspectos que se deben definir son las condiciones bajo las cuales se harán las simulaciones, la duración del tiempo que se desea simular y el número de simulaciones requeridas.

8.- Simulaciones con el modelo: En este punto se realizan los experimentos establecidos en el paso anterior, con el propósito de obtener datos que midan el comportamiento del sistema simulado, considerando las distintas condiciones de interés.

9.- Análisis de los resultados de las simulaciones: Este paso implica el análisis estadístico de los resultados provenientes del paso anterior, con el objeto de estimar los valores de las medidas de desempeño que son de interés.

10.- Simulaciones adicionales: Con base en el análisis del paso anterior, se debe determinar si son necesarias simulaciones adicionales. En caso afirmativo podría requerirse un nuevo diseño del experimento.

11.- Reporte del trabajo: Los resultados del trabajo deben ser redactados en forma clara y concisa en un reporte final. Esto tiene el propósito de describir todos los aspectos importantes del estudio, incluyendo objetivos, consideraciones para elaborar el modelo conceptual y su transformación en el modelo computacional, criterios utilizados, resultados de los experimentos, recomendaciones establecidas, conclusiones y otros datos pertinentes.

2. Formulación del problema y conceptualización del modelo.

Aquí se define el problema a resolver y los objetivos que se desean alcanzar, en este caso se incluirán datos generales del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de Mexico, así como generalidades del control de transito aereo, esto para conocer la operación de dicho aeropuerto. También se determinara el modelo a utilizar y su nivel de detalle.

2.1. Formulación del problema.

El Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México es uno de los principales aeropuertos en el ámbito mundial, dado que se encuentra en la posición número 42, en cuanto al movimiento de pasajeros y en el lugar número 38, en cuanto al número de operaciones efectuadas.

Los problemas de congestión en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM) han planteado la posibilidad de construir un nuevo aeropuerto metropolitano, cuyo costo será de varios miles de millones de dólares, por lo que la solución de este tipo de problemas es innegablemente de gran importancia práctica. dado que el AICM seguirá operando, cuando menos durante los próximos cinco años en condiciones de saturación, es importante lograr un elevado nivel de eficiencia en su operación, independientemente de la decisión que se tome para construir un nuevo aeropuerto capitalino.

2.2. Objetivos.

El objetivo de este trabajo es desarrollar dos modelos de simulación de las operaciones de despegue y aterrizaje en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, para posteriormente realizar experimentos dirigidos a obtener información en relación con el comportamiento del sistema (pistas-aeronaves); por ejemplo, al aumentar o disminuir el número de operaciones efectuadas o al hacer cambios en su capacidad para atender las operaciones de despegue y aterrizaje. Para ello, los modelos propuestos deberán simular las operaciones de despegue y aterrizaje de la aviación comercial, diferenciando los principales tipos de aeronaves y vuelos, las características de las colas en espera de servicio (tamaños mínimo, máximo y promedio, y tiempos de espera) y la utilización de las pistas del aeropuerto.

2.3 Datos y características generales del Aeropuerto seleccionado.

Nombre: Licenciado Benito Juárez.

Ubicación: México D.F.

Distancia al centro de la ciudad de México: 5 kilómetros.

Clasificación: internacional.

Tipo: metropolitano.

Clave: MEX.

Superficie: 780.8 hectáreas.

Elevación: 2,237.5 msnm.

Latitud: 19° 26' N.

Longitud: 99° 04' W.

Temperatura promedio 25° C.

Horario de operación: las 24 horas del día.

Número de pistas: 2.

Tipo de pavimento: asfáltico.

Designación Pista 1: 05I-23D.

Dimensión pista 1: 3,846×45 metros.

Designación Pista 2: 05D-23I.

Dimensión pista 2: 3,900×45 metros.

Capacidad del conjunto de pistas: 55 operaciones/hora.

Superficie de la plataforma comercial: 459,500 m².

Número de posiciones: 65 (21 de contacto y 44 remotas).

Superficie de la plataforma de aviación general: 100,000 m².

Número de posiciones: 90.

Superficie del edificio terminal: 107,800 m².

Capacidad: 5,450 pasajeros/hora.

Ayudas de navegación visuales: ayuda de aproximación PAPI (Path Approaching Precise Indicator) en ambas pistas, conos de viento (3), conos de viento iluminados (3), faro de aeródromo, luces de aproximación (ambas pistas). Radio ayudas: radio faro (VOR/DME), radar y sistema de aterrizaje por instrumentos (ILS).

Avión máximo operable: Boeing 747.

El aeropuerto de la Ciudad de México fue construido a mediados de la década de los años cincuenta, con el propósito de cubrir las demandas existentes en ese tiempo, a través del tiempo ha sido adaptado para cubrir las nuevas demandas operacionales, derivadas del incremento en el tránsito aéreo y de la evolución de las características de las aeronaves. Dado que desde su inicio el aeropuerto no fue construido de acuerdo con un plan maestro definido, su desarrollo y crecimiento no han sido ordenados, lo cual ha originado una disminución en su eficiencia.

2.4. Aspectos generales sobre el control de tránsito aéreo.

En nuestro país los servicios de control de tránsito aéreo son proporcionados por un organismo dependiente de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), conocido como Servicios a la Navegación en el Espacio Aéreo Mexicano (SENEAM). Los dos elementos que fundamentan la necesidad del control de tránsito aéreo son la seguridad y la eficiencia, tanto de las aeronaves como de la infraestructura aeroportuaria.

Para efectos del control de tránsito aéreo y navegación aérea se tienen dos tipos de reglas de vuelo, reglas de vuelo visual o VFR (Visual Flight Rules) y reglas de vuelo por instrumentos o IFR (Instrument Flight Rules). El término VFR significa que las condiciones del tiempo son lo suficientemente buenas como para mantener las distancias mínimas de separación entre aeronaves y entre aeronaves y obstáculos por referencia visual. La condición IFR, significa que las distancias mínimas de visibilidad y techo de las nubes (altura sobre el terreno hasta la base de las nubes) están por debajo de los mínimos establecidos para vuelo visual. En condiciones IFR las distancias mínimas de separación son mantenidas por el personal de los servicios de control de tránsito aéreo, mientras que en las condiciones VFR, mantener las distancias mínimas de separación es responsabilidad del piloto.

El principal objetivo de la condición IFR es prevenir colisiones, para lo cual asigna rutas y altitudes, acelera y mantiene el movimiento ordenado de las aeronaves y mantiene las distancias de separación mínimas para aeronaves que aterrizan, despegan, se aproximan o vuelan en ruta. En los últimos años se ha incrementado tanto la frecuencia de los vuelos como la velocidad de las aeronaves, lo cual ha producido congestionamientos en las áreas terminales, así como mayores riesgos de colisiones para las aeronaves. Por ello, en ciertos lugares del espacio aéreo, las reglas de vuelo por instrumentos (IFR) son obligatorias, sin importar las condiciones climáticas. A la condición anterior se le conoce como espacio aéreo de control positivo.

El servicio de control de tránsito aéreo está formado por los siguientes servicios:

1) Servicio de torre de control de aeródromo (TWR, Tower Control). La torre de control de aeródromo proporciona servicio de control a todas las aeronaves en el área de maniobra y en las inmediaciones de un aeródromo con el fin de: (1) prevenir colisiones entre las aeronaves, y entre las aeronaves y obstáculos, y (2) acelerar y mantener el movimiento ordenado de las aeronaves en su rodaje a plataforma, a pistas o a su hangar y en un radio de 18.52 kilómetros (10 millas náuticas) alrededor del aeródromo. El servicio de torre es responsable del control de las aeronaves en las calles de rodaje, de expedir las autorizaciones necesarias a todas las aeronaves para despegar y de proporcionar a los pilotos información en relación con la dirección y velocidad del viento, temperatura en la cabecera de las pistas, ajuste altimétrico y condiciones meteorológicas presentes en el aeródromo.

2) Servicio de control de aproximación (APP, Approach Control). El control de aproximación tiene una jurisdicción en el control de tránsito aéreo desde el límite de una zona de control de aeródromo hasta una distancia de 46.3 a 92.6 kilómetros (25 a 50 millas náuticas). Cuando más de un aeropuerto se encuentra en esta área, el mismo control de aproximación suministra este servicio a todos los aeropuertos dentro de su jurisdicción. El control de aproximación proporciona la guía necesaria para que las aeronaves mantengan un flujo y secuencia óptimas, con el propósito de canalizar el mayor número posible de aeronaves. Para equilibrar la carga de trabajo de los controladores, el servicio de control de aproximación se divide en sectores, dependiendo de las rutas de llegada y salida de las aeronaves, del número de controladores, de la complejidad y volumen del tránsito y de los dispositivos electrónicos con que se cuenta. El control de aproximación transfiere a las aeronaves de llegada a la torre de control de aeródromo cuando están alineadas con la pista a una distancia de aproximadamente 9.26 kilómetros (5 millas náuticas), esta distancia puede ser mayor o menor dependiendo de la orografía de las inmediaciones del aeródromo y del volumen de tránsito. Por otra parte, las aeronaves de salida son transferidas inmediatamente después de su despegue, al control de aproximación por la

torre de control de aeródromo. Si el flujo de aeronaves que requieren aterrizar es mayor que el que puede canalizarse a través de las facilidades existentes, se debe hacer esperar a las aeronaves, ya sea reduciendo sus velocidades en ruta o manteniéndolas en lugares específicos de espera dentro de la jurisdicción del control de aproximación. Al método de espera en lugares establecidos se le conoce como “escalonamiento”. El escalonar varias aeronaves consiste en mantenerlas en un patrón reglamentario de trayectos rectos (piernas) de dos minutos de duración y virajes a la izquierda de tres grados de rotación por segundo, alrededor de un punto fijo, la separación vertical entre aeronaves debe ser de cuando menos 304.8 metros (1,000 pies). La aeronave que esté en el nivel más bajo del patrón de espera, es la que será autorizada en primer lugar para hacer su aproximación al aeropuerto en el que se propone aterrizar, el resto de las aeronaves ocupará los niveles inferiores vacantes hasta que sean autorizados sus aterrizajes.

3) Centros de control de tránsito aéreo de área o ruta (ARTCC, Air Route Traffic Control Centers). Estos centros controlan el movimiento de las aeronaves a lo largo de las aerovías⁷, cada centro ejerce el control sobre un área predeterminada, definida por coordenadas geográficas, y se dedica principalmente al control de las aeronaves que operan según las reglas de vuelo por instrumentos (IFR). En los bordes de sus límites, las aeronaves se desligan del centro de control, ya sea para pasar al centro de control adyacente o para pasar a un control de aproximación. En la mayoría de los casos las áreas de control se dividen en sectores, con el objeto de equilibrar los volúmenes de trabajo para los controladores de tránsito aéreo. Las áreas de control no sólo se dividen en el plano horizontal, sino también en el plano vertical, estableciéndose un espacio aéreo inferior abajo de los 6,096 metros (ó 20,000 pies, también conocido como nivel de vuelo 200 ó FL 200) y un espacio aéreo superior arriba de los 6,096 metros (o FL 200). Los controladores en cada sector tienen la siguiente información de su área: identificación de las aeronaves, destinos, rutas a seguir, velocidades verdaderas y altitudes de vuelo.

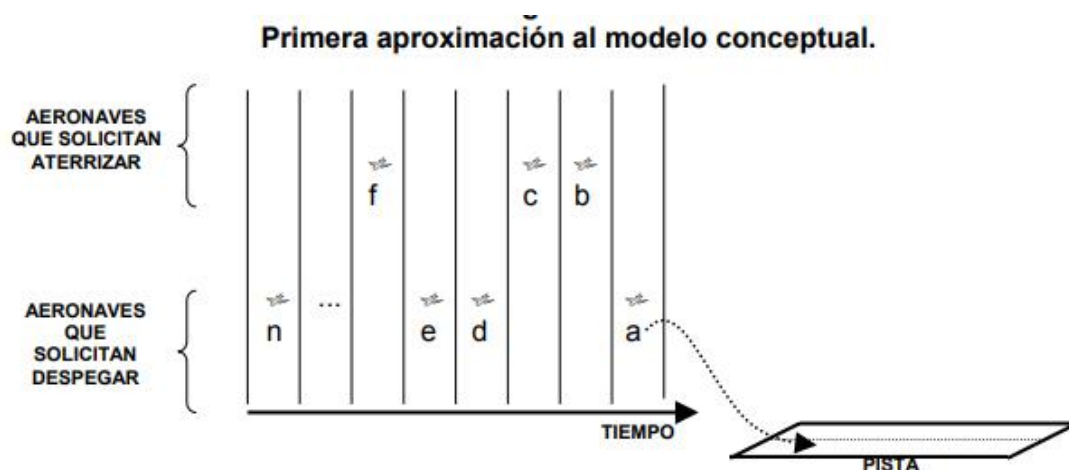
4) Servicio de información de vuelo (FIS, Flight Information Service). Los centros de información de vuelo (FSS, Flight Service Stations) están localizados a lo largo de las aerovías y en los aeródromos. Sus principales funciones son las siguientes: (1) suministrar información meteorológica de los aeródromos de salida, de llegada, alterno⁸ y en ruta; (2) proporcionar información del estado operacional de las ayudas para la navegación e instalaciones y servicios conexos de los aeródromos de salida, llegada y alterno; y (3) suministrar información del tránsito de que se tenga conocimiento.

5) Servicio de alerta (AL, Alert Service). Este servicio se proporciona cuando la aeronave no responde a llamadas que se le hagan por parte del control de tránsito aéreo. Tiene tres fases: (1) alerfa es la fase de alerta, se presenta después de que se han realizado tres llamadas o han transcurrido cinco minutos sin que una aeronave responda las llamadas; (2) incerfa es la fase de incertidumbre, se presenta después de transcurridos 30 minutos sin noticias de alguna aeronave; y (3) destresfa, esta fase se presenta después de que ha transcurrido una hora sin que se tengan noticias de alguna aeronave en vuelo.

2.5. Conceptualización del modelo.

Se puede asumir que el sistema de interés está formado por un conjunto de aeronaves en el aire que solicitan permiso para aterrizar y otro conjunto de aeronaves en tierra, que solicitan permiso para despegar. Aunque ambos conjuntos de aeronaves se ubican en lugares distintos, están ordenados en una secuencia definida, de acuerdo con el momento en que solicitaron su servicio, así la primera aeronave que haya solicitado realizar alguna operación de aterrizaje o despegue será la primera en ser atendida. A este tipo de secuencia para atender a las aeronaves se le conoce como el principio de “la primera que llega es la primera que se atiende” (FCFS, por sus siglas en inglés, First-Come, First-Served, equivalente al principio FIFO, First-In, First-Out). Únicamente en casos excepcionales, por ejemplo, en caso de falla mecánica o secuestro de la aeronave, se da otro orden de atención a

las aeronaves, lo cual es muy poco frecuente, por lo cual estos casos excepcionales no serán tomados en cuenta en este trabajo, por no ser representativos. Por otro lado, ya que la separación de las dos pistas del AICM no permite operaciones simultáneas, sino solamente secuenciales, podemos asumir, para propósitos del modelo, que existe sólo una pista, pero con la capacidad de ambas.



Puesto que de acuerdo con los objetivos establecidos en el inciso 2.2., se requiere identificar a los principales tipos de aeronaves que operan en el aeropuerto de la Ciudad de México, esta clasificación se realizará tanto para las aeronaves que solicitan aterrizar como para las que requieren despegar. Además, dado que el orden de atención de las aeronaves es establecido por el orden en que se solicita el servicio, se puede considerar que ambos grupos de aeronaves forman una sola cola imaginaria. Esta cola es imaginaria porque físicamente algunas aeronaves están en tierra y otras en el aire (en un patrón de espera). En el momento que la pista del aeropuerto esté desocupada, cada solicitud de servicio (de aterrizaje o despegue) será atendida, de acuerdo con el orden de esta cola imaginaria, en el caso de que haya nuevas aeronaves solicitando servicio, tendrán que esperar su turno formándose al final de esta cola imaginaria.

Otro detalle importante que se deberá reflejar en el modelo, es el de las unidades de tiempo que utilizará. Puesto que el intervalo requerido para atender una operación de aterrizaje o despegue, está en el rango de aproximadamente un minuto, ésta será la unidad de medida que se utilizará en el desarrollo del modelo.

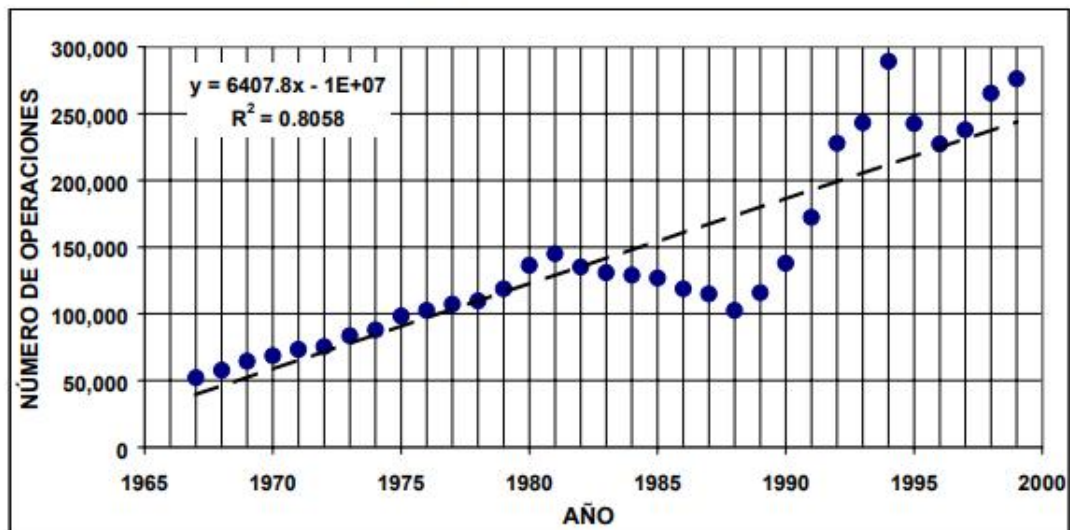
3. Información estadística de las operaciones de despegue y aterrizaje en el Aeropuerto seleccionado.

En esta sección, se establecerán distribuciones empíricas de los tiempos de llegada y salida de los principales tipos de aeronaves que operan en dicho aeropuerto. Posteriormente, mediante pruebas estadísticas, se verifica que las distribuciones empíricas se comporten como alguna distribución teórica conocida. Lo anterior tiene como propósito obtener un conjunto de parámetros (tasas de llegada y salida) que serán utilizados, en el Capítulo 4, para el desarrollo del modelo de simulación.

3.1. Comportamiento general de las operaciones de aterrizaje y despegue en el Aeropuerto seleccionado.

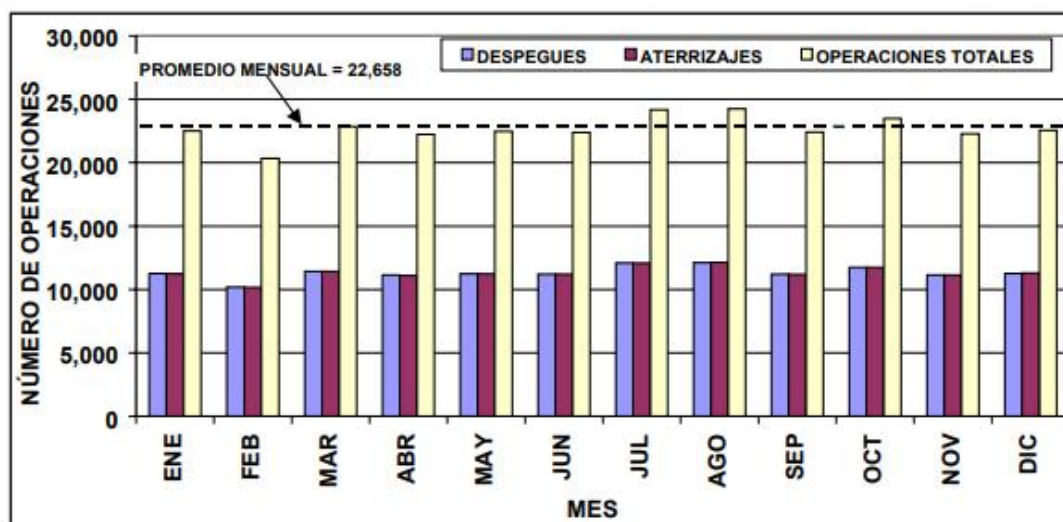
En la siguiente imagen se muestra cómo desde el final de la década de los años sesenta y hasta el principio de la década de los años ochenta, se presentó un crecimiento uniforme y sostenido del número de operaciones aéreas de la aviación comercial, en el aeropuerto de la Ciudad de México. Sin embargo, en el año de 1982 se presentó un decremento en la actividad aérea, al igual que en todos los aeropuertos de nuestro país, como consecuencia de la crisis económica que se presentó en ese año y que tuvo efectos negativos hasta el año de 1988. A partir del año 1989 y hasta el año de 1994, se tuvo un incremento en el número de operaciones aéreas en el aeropuerto de la Ciudad de México, pero con una tasa de crecimiento mayor a la de los años pasados, como lo hace evidente la mayor pendiente, durante dicho periodo, de los valores graficados. Aunque, nuevamente debido a una crisis económica en nuestro país, iniciada a finales de 1994 y principios de 1995, el número de operaciones aéreas cae durante los años de 1995 y 1996, para empezar a recuperarse a partir del año 1997; esta última tendencia de recuperación es la que persiste actualmente. La línea punteada en la imagen representa la tendencia de los valores para todo el periodo representado.

Evolución del número de operaciones aéreas (aterrizajes y despegues) de la aviación comercial en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México.



También es importante conocer cómo es el comportamiento de las operaciones aéreas, en el AICM, a lo largo de los meses del año. Para ello en la siguiente gráfica se muestra el número de operaciones aéreas realizadas durante el año de 1999.

Operaciones mensuales de despegue, aterrizaje y totales (IFR), en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México durante el año de 1999.



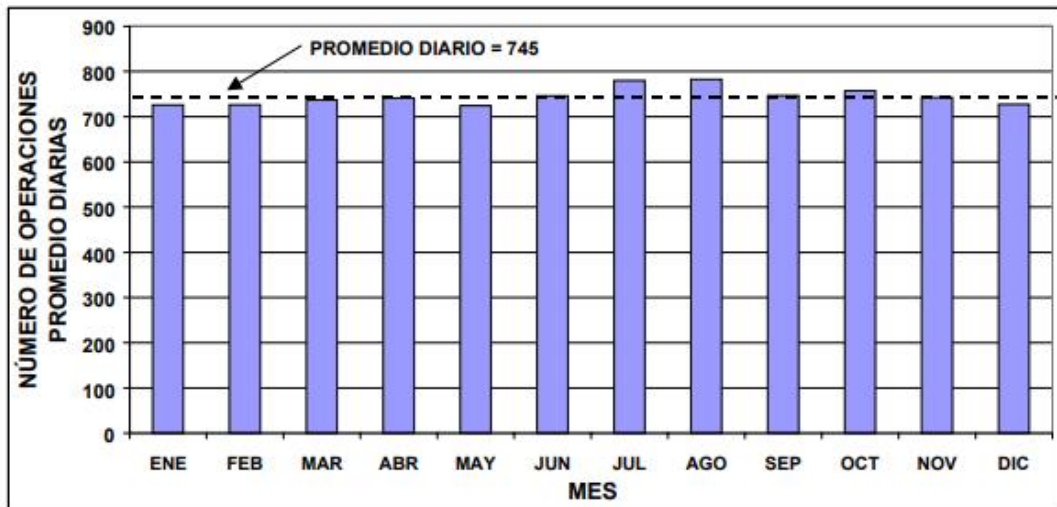
Observe que en esta figura se muestran, para cada mes, los valores del número de despegues, aterrizajes y operaciones totales (la suma de los dos primeros). Es importante señalar que el título de esta figura indica que se

muestran operaciones IFR, lo cual quiere decir que se trata de operaciones realizadas bajo las reglas de vuelo por instrumentos, en las pistas del aeropuerto; para diferenciarlas de las operaciones VFR que, en el caso del aeropuerto de la Ciudad de México, corresponden a las operaciones realizadas por los helicópteros fuera de las pistas, y que por ello no son de interés para este trabajo.

También se debe mencionar que las operaciones graficadas, incluyen tanto a la aviación comercial como a la aviación general (operación de aeronaves privadas tanto nacionales como extranjeras, así como de aeronaves de Estado, también conocidas como oficiales). El número de operaciones totales por mes tiene muy poca fluctuación, con un promedio mensual de 22,658 operaciones y una desviación estándar de 978 operaciones. También se observa un equilibrio entre el número de aterrizajes y despegues realizados mensualmente, así en promedio durante el año de 1999, el 49.97% de las operaciones correspondieron a aterrizajes y el 50.03% a despegues.

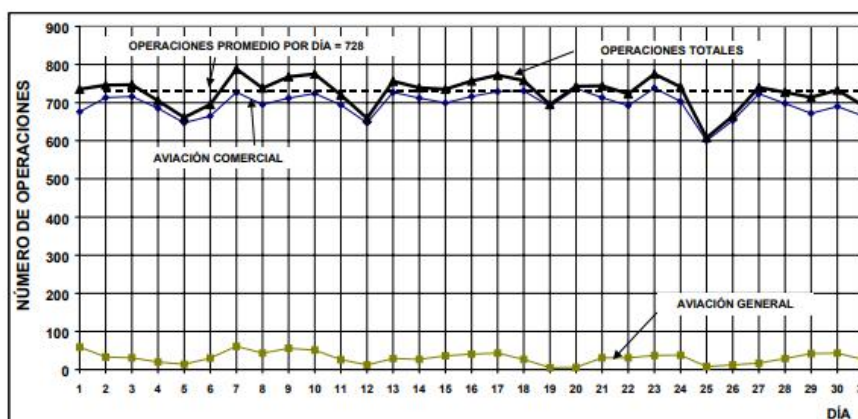
Como ya se señaló antes, la gráfica muestra las operaciones totales en el aeropuerto de la Ciudad de México, durante cada mes del año 1999, considerando desde luego la totalidad de días en cada mes; sin embargo, dado que no todos los meses del año tienen el mismo número de días, algunos meses presentarán mayor o menor número de operaciones por haber tenido más o menos días operando, independientemente de que las operaciones por día sean las mismas o muy semejantes. Para dejar más clara esta situación, en la siguiente gráfica se han tomado en cuenta los valores las operaciones promedio diarias por mes en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, durante el año 1999. Como se observa la fluctuación mensual en el número de operaciones promedio diarias es muy baja, para este año se presentó un promedio de 745 operaciones diarias, con una desviación estándar de 19 operaciones por día.

Operaciones promedio diarias por mes (IFR) en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México durante el año de 1999.

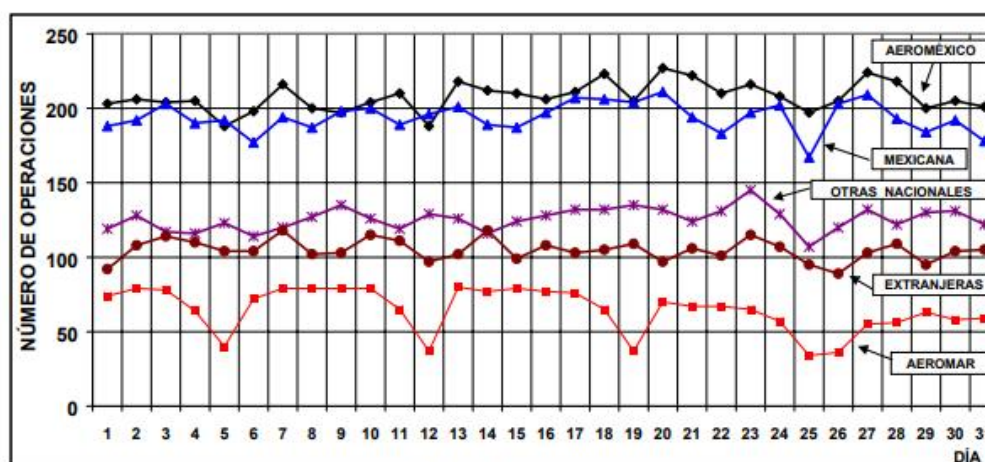


En la siguiente figura se muestra el comportamiento diario del número de operaciones aéreas IFR en el AICM, durante el mes de diciembre del año 1999. En esta figura se han representado las operaciones de la aviación comercial (tanto nacional como extranjera), así como de la aviación general y las operaciones totales (la suma de los dos anteriores). Observe como el mayor número de operaciones corresponde a la aviación comercial (96% de las operaciones totales) y en menor medida a la aviación general (4% de las operaciones totales). Al igual que en el movimiento mensual de operaciones aéreas, durante el movimiento diario se presentó una distribución equilibrada entre el número de despegues y aterrizajes (49.95% y 50.05% respectivamente). En la figura también se observa que las operaciones de despegue y aterrizaje tienen un comportamiento cíclico semanal, detectándose una reducción pequeña en el número de operaciones diarias durante los inicios de cada semana, es decir, durante los días domingo, mientras que en el resto de los días se observa una recuperación en el número de operaciones aéreas.

Operaciones (IFR) en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México durante el mes de diciembre del año 1999.



Operaciones de la aviación comercial (IFR) en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México durante el mes de diciembre del año 1999.

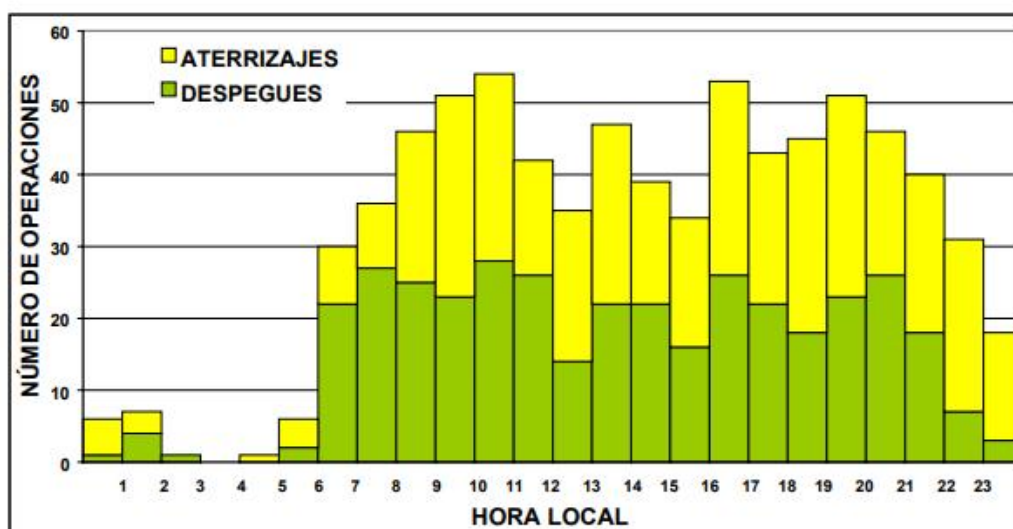


En la figura anterior se muestra el comportamiento de las operaciones de la aviación comercial (IFR) para el mes señalado antes, considerando a las principales aerolíneas que operan en el aeropuerto de la Ciudad de México. En esta figura se observan más detalles del comportamiento cíclico de las operaciones aéreas. También se observa que el mayor número de operaciones son efectuadas por las aerolíneas nacionales (85% del total) y en menor grado por las aerolíneas extranjeras (15% del total). Otra observación importante es que tan solo tres aerolíneas nacionales, generan dos tercios del total de las operaciones comerciales en este aeropuerto (Aeroméxico el 30%, Mexicana el 28% y Aeromar el 9%).

En la figura siguiente se observa el comportamiento de las operaciones (IFR) de aterrizaje y despegue en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de

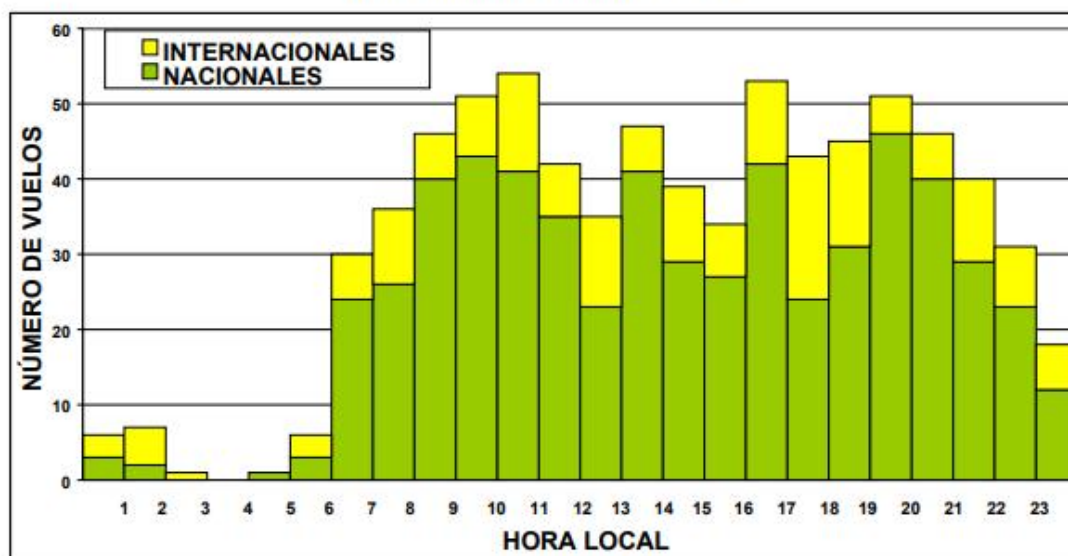
México, durante un día típico del mes de enero del año 2000. Cabe señalar que se trata de operaciones de la aviación comercial únicamente, dado que la información para la aviación general con ese detalle no está disponible, sin embargo, se debe recordar que las operaciones de la aviación general representan aproximadamente el 4% de las operaciones totales (IFR) del aeropuerto de la Ciudad de México. Como se observa en esta figura, hay dos patrones marcados de comportamiento en cuanto al número de operaciones realizadas a lo largo del día. El primero se ubica entre las 0 y 6 horas; en este intervalo se registra un comportamiento con muy pocas operaciones aéreas, en este lapso sólo se realizaron 21 operaciones, lo cual representa el 2.7% de las operaciones totales diarias, de hecho entre las 2:17 y 4:43 horas no se realizó ninguna operación aérea en el aeropuerto, es decir, durante un lapso de dos horas y veintiséis minutos (10.1% del día) las pistas del aeropuerto no fueron utilizadas. El segundo comportamiento se observa después de las 6 horas y hasta la media noche. Durante esta etapa se efectúa el mayor número de operaciones aéreas. Obsérvese como esta etapa empieza con una mayor actividad de las operaciones de despegue; en cambio, la mayor actividad de las operaciones de aterrizaje empieza dos horas más tarde (a las 8 horas), lo inverso ocurre al terminar el día, dado que las operaciones de despegue disminuyen su frecuencia dos horas antes de la media noche; en cambio, las operaciones de aterrizaje se mantienen hasta esa hora.

Operaciones de la aviación comercial (IFR) en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México durante un día típico del mes de enero del año 2000.



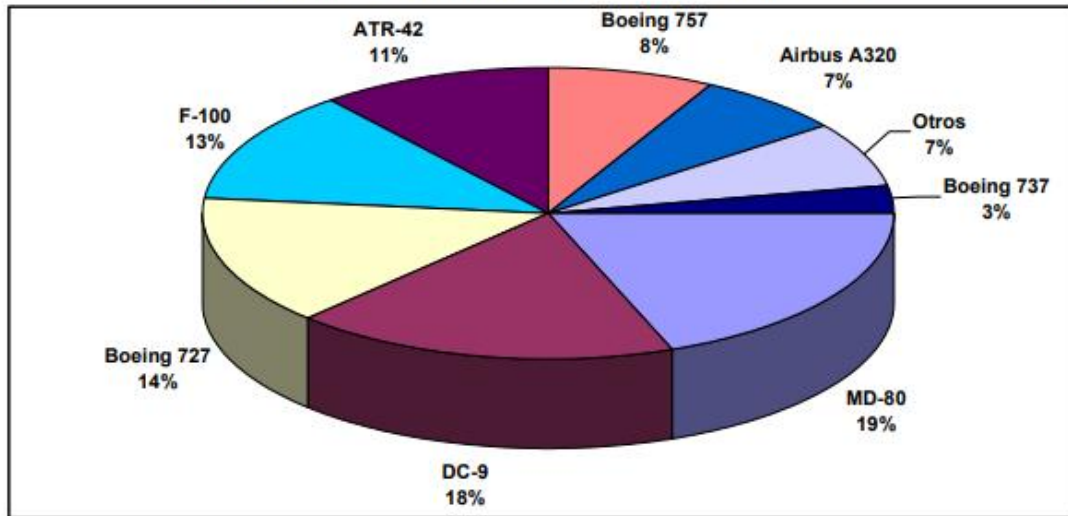
En la siguiente gráfica se muestra el comportamiento de las operaciones (IFR) de la aviación comercial en el AICM, para un día típico del mes de enero del año 2000, pero ahora diferenciando a los vuelos como nacionales o internacionales. Como se observa la mayor parte de las operaciones aéreas corresponden a los vuelos nacionales (cerca del 77% del total de los vuelos), mientras que los vuelos internacionales tienen una menor participación, con aproximadamente el 23% de las operaciones aéreas.

Vuelos nacionales e internacionales de la aviación comercial (IFR) en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México durante un día típico del mes de enero del año 2000.



Por otro lado, la gráfica de pastel muestra los porcentajes de operaciones aéreas realizados en el aeropuerto de la Ciudad de México, para cada uno de los distintos tipos de aeronaves de la aviación comercial, durante el primer cuatrimestre del año 2000. En total fueron observados dieciocho tipos distintos de aeronaves; sin embargo, los ocho tipos especificados en la figura realizan el 93% del total de las operaciones aéreas y los otros diez tipos (indicados como “otros” en la gráfica) tan sólo producen el 7% de las operaciones aéreas. La concentración de las operaciones, en ciertos tipos de aeronaves, se hace más evidente al observar que sólo tres tipos de aeronaves (MD-80, DC-9 y Boeing 727) realizan más de la mitad del total de las operaciones de aterrizaje y despegue.

Porcentajes de operaciones aéreas realizadas en el aeropuerto de la Ciudad de México, para los distintos tipos de aeronaves de la aviación comercial (IFR), durante el primer cuatrimestre del año 2000.



Para los propósitos de este trabajo se considerarán como los principales tipos de aeronaves aquellos que generan cuando menos el setenta y cinco por ciento de las operaciones aéreas, el resto de los tipos de aeronaves también serán considerados, pero bajo la clasificación de “otros tipos”. Lo anterior significa que se tendrá la siguiente clasificación de aeronaves: MD-80, DC-9, Boeing 727, F100, ATR-42 y “otros tipos”.

3.2. Distribuciones empíricas y pruebas de bondad de ajuste para las tasas de llegada y salida de aeronaves.

Con base en los tiempos de llegada y salida de aeronaves al aeropuerto de la Ciudad de México, es posible obtener una función de densidad de probabilidad (fdp) empírica de los tiempos entre llegadas y entre salidas de las aeronaves, con el objeto de posteriormente determinar fdp teóricas que describan dichos comportamientos. Estas fdp teóricas serán utilizadas, posteriormente, para el desarrollo del modelo de simulación en un programa de computadora.

La determinación o estimación de cualquier fdp empírica se basa en los datos que se recogen de la situación bajo estudio. En nuestro caso, para estimar la fdp de los tiempos entre llegadas (y entre salidas) al aeropuerto de la Ciudad

de México, primero se debe registrar la hora en que las aeronaves aterrizan (y despegan) del aeropuerto. Posteriormente, se deben obtener los tiempos entre llegadas (y entre salidas), al calcular las diferencias sucesivas entre cada operación de aterrizaje (y despegue). Todos estos datos posteriormente deben ser resumidos en un histograma de frecuencias, a partir del cual se determina la fdp empírica asociada. Enseguida, mediante pruebas de bondad de ajuste (Kolmogorov-Smirnov y chi-cuadrada) se debe probar que la fdp empírica se puede modelar mediante una fdp teórica conocida¹⁰. En este trabajo con base en información proporcionada por SENEAM, se obtuvieron los tiempos entre llegada y entre salida de los principales tipos de aeronaves que operan en el aeropuerto de la Ciudad de México (para un día típico del mes de enero del año 2000). Partiendo de esta información y como resultado del procedimiento anterior, se observó que aunque los datos cumplían satisfactoriamente con la prueba Kolmogorov-Smirnov, no cumplían con la prueba de chi-cuadrada. Al revisar los datos se detectó que esto se debía a que para todos los casos, se presenta un intervalo (entre las 0 y 6 horas) en el cual el número de operaciones es muy bajo (véase Figura 3.6.). Esta situación genera valores de tiempo entre llegadas y entre salidas muy altos para dicho intervalo, en comparación con los del resto del día. Para solventar esta situación, se decidió no considerar al intervalo con relativamente pocas operaciones aéreas (entre las 0 y 6 horas), dado que su comportamiento no corresponde a ninguna fdp teórica conocida, por lo que este intervalo no podrá ser simulado. Afortunadamente, dicho intervalo no es de interés, puesto que en él se realizan muy pocas operaciones aéreas. Al eliminar estos tiempos de entre llegadas y entre salidas, para cada uno de los principales tipos de aeronaves, y al aplicar las pruebas de bondad de ajuste, se pudo probar que las fdp empíricas se pueden modelar mediante fdp teóricas conocidas, tanto con la prueba de Kolmogorov-Smirnov como con la de chi-cuadrada. Aunque todos los cálculos anteriores se efectuaron para un tipo de distribución exponencial, también se realizaron pruebas con otros tipos de distribuciones, entre ellas la rectangular, la chi-cuadrada y la gamma. Sin embargo, la distribución exponencial fue la que mejor se ajustó a las pruebas de bondad, enseguida estuvo la distribución gamma, después la distribución chi-cuadrada y finalmente la rectangular.

En las Tablas 3.1. y 3.2. se muestra un resumen de los principales resultados obtenidos, durante el análisis de las distribuciones empíricas. Dentro de éstas se muestran los valores de las tasas de llegada y salida por unidad de tiempo, los tiempos promedios entre llegadas y entre salidas, y los valores observados y críticos para las pruebas de bondad de ajuste, para cada uno de los principales tipos de aeronaves utilizados en el aeropuerto de la Ciudad de México. Nótese como en todas las pruebas de bondad de ajuste, se cumple que los valores observados de la desviación D y χ^2 , son menores que los valores críticos, por lo que en todos los casos se acepta la hipótesis de que los valores se extraen de una fdp exponencial hipotética.

Tabla 3.1.

Resumen de los resultados de la distribución exponencial empírica de los aterrizajes de aeronaves, considerando una operación diaria desde las 6:00 horas y hasta las 24:00 horas, en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México.

TIPO DE AERONAVE	λ TASA DE LLEGADA DE AERONAVES POR UNIDAD DE TIEMPO (minutos ⁻¹)	$1/\lambda$ TIEMPO PROMEDIO ENTRE LLEGADA DE AERONAVES (minutos)	PRUEBA KOLMOGOROV-SMIRNOV			PRUEBA CHI-CUADRADA		
			N NÚMERO DE OBSERV.	D MAYOR DESVIACIÓN OBSERVADA	$D_{0.05}$ VALOR CRÍTICO	GRADOS DE LIBERTAD	χ^2 VALOR OBSERVADO	$\chi^2_{0.05}$ VALOR CRÍTICO
MD-80	0.069102	14.4714	70	0.04392	0.16255	5	3.796	11.070
DC-9	0.071201	14.0448	67	0.04437	0.16615	4	5.225	9.488
Boeing 727	0.053950	18.5357	56	0.06518	0.18173	2	1.464	5.991
F-100	0.044890	22.2767	47	0.06386	0.19837	2	1.284	5.991
ATR-42	0.044395	22.5250	40	0.07407	0.21503	4	2.327	9.488
Otros tipos	0.077686	12.8723	94	0.03061	0.14027	5	10.639	11.070

Tabla 3.2.

Resumen de los resultados de la distribución exponencial empírica de los despegues de aeronaves, considerando una operación diaria desde las 6:00 horas y hasta las 24:00 horas, en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México.

TIPO DE AERONAVE	λ TASA DE SALIDA DE AERONAVES POR UNIDAD DE TIEMPO (minutos ⁻¹)	$1/\lambda$ TIEMPO PROMEDIO ENTRE SALIDA DE AERONAVES (minutos)	PRUEBA KOLMOGOROV-SMIRNOV			PRUEBA CHI-CUADRADA		
			N NÚMERO DE OBSERV.	D MAYOR DESVIACIÓN OBSERVADA	$D_{0.05}$ VALOR CRÍTICO	GRADOS DE LIBERTAD	χ^2 VALOR OBSERVADO	$\chi^2_{0.05}$ VALOR CRÍTICO
MD-80	0.077170	12.9583	72	0.03167	0.16027	4	3.878	9.488
DC-9	0.079009	12.6567	67	0.02683	0.16615	4	3.182	9.488
Boeing 727	0.047206	21.1837	49	0.05229	0.19428	2	0.636	5.991
F-100	0.047619	21.0000	45	0.06187	0.20273	4	1.747	9.488
ATR-42	0.043771	22.8462	39	0.05577	0.21777	2	2.961	5.991
Otros tipos	0.075596	13.2283	92	0.04565	0.14179	2	0.819	5.991

4. Desarrollo del modelo en un programa de computadora, validación y verificación.

En este capítulo, se establece el programa de cómputo que será utilizado, se formula el modelo mediante un diagrama de flujo y se procede después a la etapa de codificación. También en esta sección, se definen las condiciones de entrada e iniciales del modelo, se realizan pruebas piloto y por último se procede a la validación y verificación del modelo.

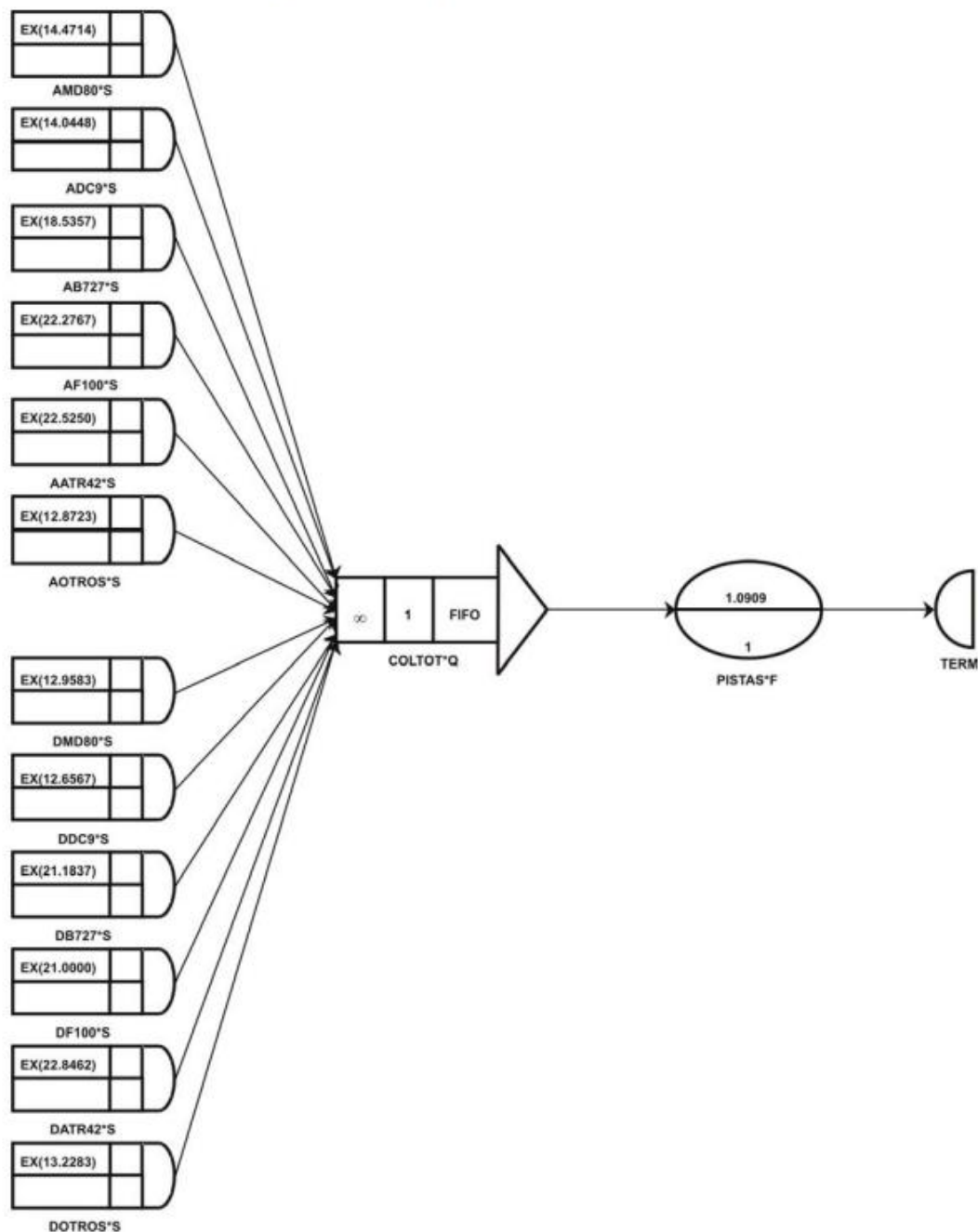
4.1. Selección del programa de simulación.

En el caso que nos ocupa fueron considerados los programas de simulación GPSS y SIMNET II. Ambos programas de simulación están orientados a procesos, por lo que usan bloques o nodos que se pueden unir para formar una red que describe los movimientos de transacciones, entidades o clientes (en nuestro caso aeronaves). Cada bloque o nodo tiene instrucciones permanentes que definen exactamente cómo y cuándo se mueven las transacciones en la red de simulación. El programa orientado a procesos más antiguo es el GPSS. Este programa, desarrollado a principios de la década de los sesenta, ha evolucionado con los años para dar cabida a las nuevas necesidades de modelado de sistemas complejos. Por otro lado, el nuevo programa de simulación orientado a procesos, llamado SIMNET II, está diseñado para permitir el modelado de situaciones complejas de forma directa. Este programa utiliza tres nodos: una fuente que crea transacciones, una cola donde las transacciones pueden esperar y una instalación donde se realiza el servicio. Un cuarto nodo, llamado auxiliar (instalación de capacidad infinita), está diseñado para aumentar las capacidades de modelado. Dado que SIMNET II resulta más sencillo de codificar, manejar y cumple con los objetivos perseguidos en este trabajo, fue el programa elegido para elaborar el modelo de simulación.

4.2. Construcción del modelo de simulación.

Antes de iniciar la codificación en el ambiente de simulación SIMNET II, fue necesario representar, mediante un diagrama de flujo, la red que describe los movimientos de las operaciones de aeronaves en el aeropuerto de la Ciudad de México.

Diagrama de flujo del sistema a simular.



A continuación se indican algunos significados relevantes de los nodos y de sus campos (valores dentro de los nodos). En el extremo izquierdo de esta figura se muestra un conjunto de doce nodos, estos nodos representan doce fuentes distintas, que tienen la característica de crear transacciones, en nuestro caso generan aterrizajes o despegues de aeronaves. Obsérvese cómo debajo de cada uno de estos nodos está indicado su nombre respectivo, el cual, en el caso de los aterrizajes, empieza con una letra “A” y en el caso de los despegues con una letra “D”. Después de las letras “A” o “D”, se indica que tipo de aeronave genera la operación aérea en cada una de las doce fuentes representadas. También debe observarse cómo al final de cada nombre de las fuentes aparece la terminación “*S”, la cual indica que se trata de un nodo fuente (SOURCE). Dentro del símbolo de cada nodo fuente (en su parte superior izquierda) se observan las letras “EX” y una cifra entre paréntesis, lo cual indica que la generación de aterrizajes o despegues, en dichos nodos, tiene una distribución exponencial con un valor, expresado en minutos, igual a la cifra entre paréntesis. Cabe señalar que estos valores corresponden a los tiempos promedio entre llegadas y entre salidas de aeronaves, establecidos en las Tablas 3.1. y 3.2.

Después de cada nodo fuente se indica, con una flecha, la dirección hacia la que se dirigen las operaciones generadas, todas las operaciones provenientes de los nodos fuente van a un nodo común, conocido como nodo cola. El nombre asignado al nodo cola es “COLTOT*Q”, lo cual quiere decir que se trata de la cola total de las operaciones de aterrizaje y despegue, la terminación de este nombre, “*Q”, sirve para designar a cualquier nodo cola (QUEUE). Obsérvese cómo dentro del símbolo del nodo cola hay tres cajones, que representan a tres campos de este nodo, el primer campo de izquierda a derecha (conocido como F1), sirve para indicar el tamaño máximo de la cola, en este caso se decidió utilizar un tamaño infinito (∞), con el objeto de poder registrar cualquier tamaño de cola durante las simulaciones; en el segundo campo (F2) se indica el número de transacciones entrantes por cada transacción que sale, en el caso bajo estudio es igual a 1; y en el tercer campo (F3) se registra la disciplina que sigue la cola, como ya fue señalado en el caso de las operaciones aéreas se sigue el principio FIFO.

Posteriormente, todas las transacciones (aterrizajes y despegues) que salen del nodo cola, "COLTOT*Q", se dirigen mediante una flecha al nodo instalación, que se ha identificado con el nombre "PISTAS*F", el cual representa a las pistas del aeropuerto. La terminación del nombre, "*F", indica que se trata de un nodo tipo instalación (FACILITY). Dentro del símbolo de este nodo se ubican dos campos, el de la mitad superior (F2) indica el tiempo, en minutos¹⁵, que dura cada servicio en las pistas. Como se mencionó antes, en el inciso 2.3., la capacidad del conjunto de las dos pistas del aeropuerto de la Ciudad de México, es igual a 55 operaciones por hora, lo cual equivale a $55/60 = 0.9166$ operaciones/minuto, por lo que cada operación completa se efectúa en $1/0.9166 = 1.0909$ minutos. Por otro lado, el campo situado en la mitad inferior del símbolo del nodo PISTAS*F (F3), representa al número de servidores en paralelo, en nuestro caso es igual a 1.

Después que cada transacción (aterrizaje o despegue) ha pasado por el nodo PISTAS*F, termina su actividad se representa mediante un símbolo, al final del diagrama, en forma de medio círculo y al cual se le da el nombre de TERM. Nótese que este último símbolo no es un nodo.

Con base el diagrama de flujo es posible codificar al modelo del sistema bajo estudio, en el programa de simulación SIMNET II.

Sin embargo, hay que señalar antes dos aspectos específicos del ambiente de simulación SIMNET II. El primero es que en este programa, cuando no se indica algún valor (omisión), en los campos de los nodos, el ambiente de simulación considerará ciertos valores preestablecidos. El segundo aspecto es en relación con las condiciones de entrada e iniciales. Existen dos condiciones importantes, la primera sirve para proporcionar una estimación de los requisitos de memoria en los archivos del modelo (estimación de transacciones en el sistema en cualquier momento). Esta estimación se establece entre paréntesis después de las palabras "DIMENSION;ENTITY", en el segundo renglón de la codificación. La segunda condición importante es la relacionada con la duración del tiempo que se desea simular. Este tiempo se establece en el penúltimo renglón de la codificación, mediante el término definido como "\$RUN-LENGTH=". El valor que se indique después del signo

igual, representa el tiempo en minutos que se desea simular. En la codificación mostrada en el diagrama de flujo, se asumió que no habría más de 790 operaciones en el sistema en cualquier momento y se estableció un tiempo de simulación igual a 18 horas, es decir 1,080 minutos (de las 06:00 a las 24:00 horas).

Observe en el Cuadro 4.1., como a esta primera aproximación del programa del modelo de simulación, de las operaciones de aterrizaje y despegue en el aeropuerto de la Ciudad de México, se le llamó AICM1 (véase el primer renglón, después de la palabra “\$PROJECT;”). También en este cuadro se pueden detectar fácilmente los nodos fuente (*S), tanto para los aterrizajes como para los despegues, así como al nodo cola (*Q) y al nodo instalación (*F).

Cuadro 4.1.
Primera aproximación al programa del modelo de simulación, de las operaciones de aterrizaje y despegue, en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México

```
$PROJECT;AICM1;19/DIC/00;ALFONSO HERRERA:
$DIMENSION;ENTITY(790):
$BEGIN:
AMD80*S;EX(14.4714);GOTO-COLTOT:
ADC9*S;EX(14.0448);GOTO-COLTOT:
AB727*S;EX(18.5357);GOTO-COLTOT:
AF100*S;EX(22.2767);GOTO-COLTOT:
AATR42*S;EX(22.5250);GOTO-COLTOT:
AOTROS*S;EX(12.8723);GOTO-COLTOT:
DMD80*S;EX(12.9583);GOTO-COLTOT:
DDC9*S;EX(12.6567);GOTO-COLTOT:
DB727*S;EX(21.1837);GOTO-COLTOT:
DF100*S;EX(21.0000);GOTO-COLTOT:
DATR42*S;EX(22.8462);GOTO-COLTOT:
DOTROS*S;EX(13.2283);GOTO-COLTOT:
COLTOT*Q;GOTO-PISTAS:
PISTAS*F;;1.0909;*TERM:
$END:
$RUN-LENGTH=1080:
$STOP:
```

4.3. Simulación de operaciones aeroportuarias.

Con la primera aproximación al programa del modelo de simulación, establecida en el Cuadro 4.1. fue posible realizar una prueba piloto, para ello

se debe ejecutar dicho programa. En el ambiente de simulación SIMNET II, el resultado de una ejecución (corrida) se muestra como un reporte de salida (SIMNET II OUTPUT REPORT). Una guía del significado de los principales términos utilizados en los reportes de salida se muestra en el Anexo A. El reporte de salida de la primera prueba piloto, del modelo de simulación, se muestra en el Cuadro 4.2.

Cuadro 4.2.
Reporte de salida de la primera prueba piloto del modelo de simulación.

```
SIMNET II Simulation System (Rel 2.101). Copyright (c) 1990-93 SimTec, Inc.
Date: Tue Feb 13 11:15:13 2001
System Array Utilization:  C-array = 94%  G-array = 6%  AZ-array = 56%
*****
* SIMNET II OUTPUT REPORT *
*****

PROJECT: AICM1      RUN LENGTH = 1080.00      NBR RUNS = 1
DATE: 19/DIC/00      TRANSIENT PERIOD = .00    OBS/RUN = 1
ANALYST: ALFONSO HERRERA  TIME BASE/OBS = 1080.00

***WARNING: System void of ACTIVE transactions exactly at T = 1079.764000
All TIME.BASED statistics are based on given interval
***INDEPENDENT RUNS DATA ***

*** RUN 1:
```

QUEUES						
CAPA- CITY	IN:OUT RATIO	AVERAGE LENGTH	MIN/MAX/ LAST LEN	AV. DELAY (ALL)	AV. DELAY (+VE WAIT)	% ZERO WAIT TRANSACTION
COLTOT	**** 1: 1	1.65	0/ 13/ 9	2.25	2.78	19.02

```

*****
FACILITIES
*****
```

NBR SRVRS	MIN/MAX/ LAST UTILZ	AV. GROSS UTILIZ	AVERAGE BLOCKAGE	AVERAGE BLKGE TIME	AVERAGE IDLE TIME	AVERAGE BUSY TIME
PISTAS 1	0/ 1/ 1	.7928	.0000	.00	1.49	5.74

```

*** TRANSACTIONS COUNT AT T = 1079.8 OF RUN 1:
```

NODE	IN	OUT	RESIDING	SKIPPING (BLOCKED)	UNLINKED/LINKED (DESTROYED)	TERMINATED
*S:						
AMD80		81			(0)	0
ADC9		75			(0)	0
AB727		64			(0)	0
AF100		56			(0)	0
AATR42		54			(0)	0
AOTROS		91			(0)	0
DMD80		89			(0)	0
DDC9		72			(0)	0
DB727		43			(0)	0
DF100		49			(0)	0
DATR42		51			(0)	0
DOTROS		69			(0)	0
*Q:						
COLTOT	643	634	9	151	0/0	0
*F:						
PISTAS	785	784	1	(0)	(0)	784

```

Executiontime=.00minutes

END OF SIMULATION SESSION
```

Dentro de algunos de los datos y resultados de este reporte se puede observar que, el proyecto (PROJECT) se llama AICM1, la duración establecida del tiempo de simulación es de 1,080 minutos (RUN LENGTH).

En la sección de colas (QUEUES) se observa que la cola (COLTOT) tiene una capacidad infinita (CAPACITY) y que el número promedio de operaciones en espera durante toda la corrida fue de 1.65 (AVERAGE LENGTH), la longitud máxima de cola durante toda la prueba fue de 13 aeronaves (MAX), mientras que el tamaño de la última cola fue de 9 aeronaves (LAST LEN). El tiempo promedio de espera de todas las operaciones (incluyendo a las operaciones con tiempo de espera igual a cero) fue de 2.25 minutos (AV:DELAY ALL), y el tiempo promedio de espera de las operaciones con tiempo de espera distinto de cero fue de 2.78 minutos (AV. DELAY +VE WAIT). El porcentaje de operaciones que solicitaron servicio (de aterrizaje o despegue) y que no tuvieron que esperar (% ZERO WAIT TRANSACTION) fue de 19.02%. Pasando a la sección de instalaciones (FACILITIES) se observa que el nodo PISTAS está formado por un solo servidor (NBR SRVRS) y que en promedio 0.7928 servidores (de 1) estuvieron ocupados a lo largo de la corrida. El tiempo promedio que las pistas permanecieron inactivas entre períodos ocupados fue de 1.49 minutos (AVERAGE IDLE TIME), y el tiempo promedio que las pistas permanecen ocupadas antes de quedar otra vez inactivas fue de 5.74 minutos (AVERAGE BUSY TIME). En la última sección del reporte se contabilizan las transacciones durante la prueba (TRANSACTIONS COUNT ATT=). Por ejemplo, se observa que se crearon 81 operaciones de aterrizaje, de aeronaves MD-80 (AMD80 OUT). También se observa que ingresaron 643 aeronaves a la cola de espera (IN) y que salieron 634 (OUT), la diferencia (9 aeronaves) permaneció en la cola al terminarse el tiempo de la simulación (RESIDING). Observe cómo 151 operaciones aéreas no tuvieron que hacer cola (SKIPPING), es decir, su tiempo de espera en la cola fue igual a cero minutos. A las pistas ingresaron (IN) 785 aeronaves (634 que salieron de la cola y 151 que pasaron directamente), de las cuales 784 terminaron su servicio (TERMINATED) y sólo una aeronave quedó en la pista (RESIDING) al momento de acabarse el tiempo de la simulación.

Cabe señalar que el tiempo requerido para ejecutar la simulación anterior (Execution time) fue del orden de décimas de segundo, en el reporte de salida se indica un valor de 0.00 minutos. Para estimar el comportamiento

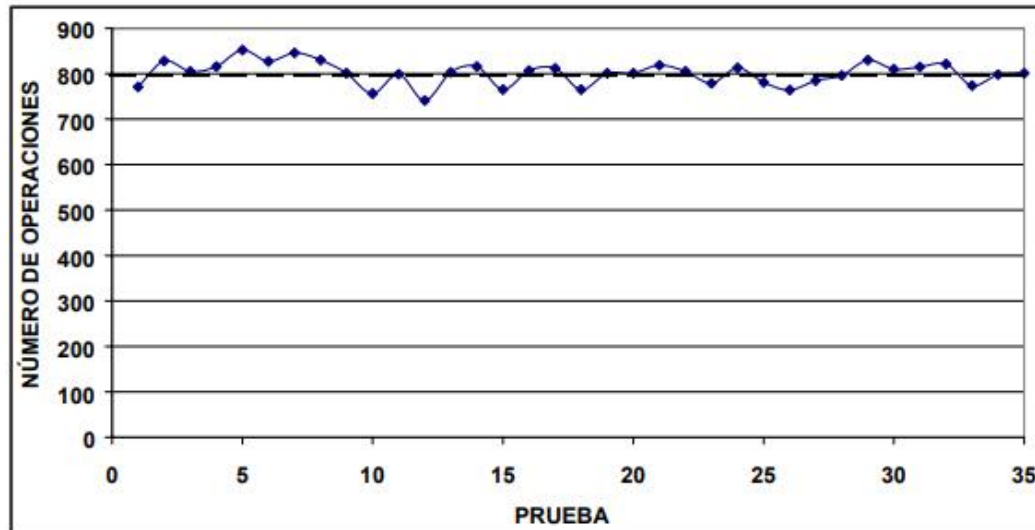
general del modelo se deben realizar más pruebas piloto con el modelo, pero cambiando la serie aleatoria (semilla) en los valores que generan las operaciones exponenciales. Para hacer esto en el ambiente SIMNET II, después del valor de los tiempos exponenciales de llegadas y salidas, se debe indicar, después de una coma, un número aleatorio entero distinto de cero, dentro del rango de -50 y $+50$. En el Anexo B se muestra una tabla con números aleatorios, que reúnen los requisitos anteriores, y que será utilizada en las siguientes pruebas. Cabe señalar que el valor por omisión de este número aleatorio es igual a 1, este fue el valor asumido en la ejecución inicial del programa de simulación en el Cuadro 4.2. Como resultado de estas pruebas piloto se encontró que en promedio el modelo establecido en el Cuadro 4.1., generó 801 operaciones aéreas durante un lapso de simulación de 18 horas (véase Tabla 4.1.). Cabe señalar que en el aeropuerto de la Ciudad de México, durante el primer semestre del año 2000, se efectuaron en promedio por día, 800 operaciones reales¹⁶, por lo que se puede decir que el modelo propuesto se asemeja en buena medida al comportamiento real. Cabe recordar que el modelo de simulación propuesto, no considera las seis primeras horas de operación del aeropuerto, aunque estas operaciones son un porcentaje muy bajo del total de operaciones (2.75%), aún así, el número de operaciones reales y el generado por el modelo de simulación, es muy similar.

Tabla 4.1.
Resultados del modelo de simulación al realizar 35 pruebas piloto.

PRUEBA	NÚMERO ALEATORIO UTILIZADO	OPERACIONES TERMINADAS EN UNA SIMULACIÓN DE 18 HORAS	OPERACIONES TERMINADAS PROMEDIO DE LAS PRUEBAS	OPERACIONES GENERADAS POR TIPO DE AERONAVE											
				MD-82		DC-3		BOEING 737		F-100		ATR-42		OTROS	
				NÚMERO	%	NÚMERO	%	NÚMERO	%	NÚMERO	%	NÚMERO	%	NÚMERO	%
1	26	771	771.00	158	20.47	139	18.01	112	14.51	100	12.95	97	12.56	166	21.50
2	-21	828	799.50	182	21.95	164	19.78	117	14.11	103	12.42	108	13.03	155	18.70
3	14	805	801.33	151	18.76	155	19.25	120	14.91	105	13.04	90	11.18	184	22.86
4	-20	816	805.00	164	20.10	137	16.79	114	13.97	110	13.48	110	13.48	181	22.18
5	38	852	814.40	185	21.66	190	22.25	110	12.88	104	12.18	92	10.77	173	20.26
6	-39	827	816.50	171	20.68	167	20.19	113	13.66	109	13.18	89	10.76	178	21.52
7	2	846	820.71	173	20.40	180	21.23	114	13.44	116	13.68	88	10.38	177	20.87
8	-50	830	821.88	159	19.13	182	19.49	110	13.24	118	14.20	103	12.39	179	21.54
9	12	801	819.56	177	22.07	169	21.07	114	14.21	83	10.35	106	13.22	153	19.08
10	44	756	813.20	128	16.84	164	21.58	124	16.32	86	11.32	101	13.29	157	20.66
11	37	799	811.91	153	19.15	168	21.03	112	14.02	103	12.89	99	12.39	164	20.53
12	42	741	806.00	162	21.86	150	20.24	95	12.82	87	11.74	87	11.74	160	21.59
13	34	803	805.77	156	19.43	165	20.55	107	13.33	115	14.32	86	10.71	174	21.67
14	-20	816	806.50	164	20.10	137	16.79	114	13.97	110	13.48	110	13.48	181	22.18
15	-25	765	803.73	152	19.87	171	22.35	109	14.25	82	10.72	95	12.42	156	20.39
16	-45	807	803.94	157	19.43	148	18.32	109	13.49	113	13.99	94	11.63	187	23.14
17	48	812	804.41	161	19.63	161	19.63	109	13.29	107	13.05	95	11.59	187	22.80
18	-25	765	802.22	152	19.87	171	22.35	109	14.25	82	10.72	95	12.42	156	20.39
19	12	801	802.16	177	22.07	169	21.07	114	14.21	83	10.35	106	13.22	153	19.08
20	-18	801	802.10	158	19.70	167	20.82	110	13.72	90	11.22	119	14.84	158	19.70
21	-42	819	802.90	173	20.92	182	22.01	120	14.51	101	12.21	99	11.97	152	18.38
22	15	805	803.00	157	19.48	156	19.35	107	13.28	117	14.52	97	12.03	172	21.34
23	7	779	801.96	153	19.54	173	22.09	106	13.54	100	12.77	105	13.41	146	18.65
24	-33	813	802.42	154	18.92	155	19.04	126	15.48	112	13.76	109	13.39	158	19.41
25	-22	781	801.56	167	21.36	135	17.26	101	12.92	103	13.17	93	11.88	183	23.40
26	16	764	800.12	144	18.85	157	20.55	100	13.09	107	14.01	100	13.09	156	20.42
27	-13	785	799.56	156	19.82	144	18.30	112	14.23	104	13.21	113	14.36	158	20.08
28	-24	796	799.43	141	17.65	179	22.40	86	10.76	118	14.52	103	12.85	174	21.78
29	-50	830	800.48	159	19.13	162	19.49	110	13.24	118	14.20	103	12.39	179	21.54
30	36	810	800.80	175	21.45	161	19.73	100	12.25	105	12.87	107	13.11	168	20.99
31	-7	815	801.26	167	20.49	145	17.75	114	13.99	106	13.01	102	12.52	181	22.21
32	30	821	801.88	157	19.08	180	21.87	109	13.24	107	13.00	102	12.39	168	20.41
33	29	774	801.03	159	20.52	159	20.52	97	12.62	99	12.77	102	13.16	159	20.52
34	18	798	800.94	167	20.88	141	17.83	106	13.25	113	14.13	90	11.25	183	22.88
35	-18	801	800.94	158	19.70	167	20.82	110	13.72	90	11.22	119	14.84	158	19.70
PROMEDIO		800.94		160.77	20.03	160.86	20.05	109.71	13.67	102.97	12.82	100.40	12.52	167.83	20.91
DESVIACIÓN ESTÁNDAR		25.38		11.62	1.21	13.99	1.67	7.90	0.95	11.13	1.21	8.56	1.10	12.06	1.35

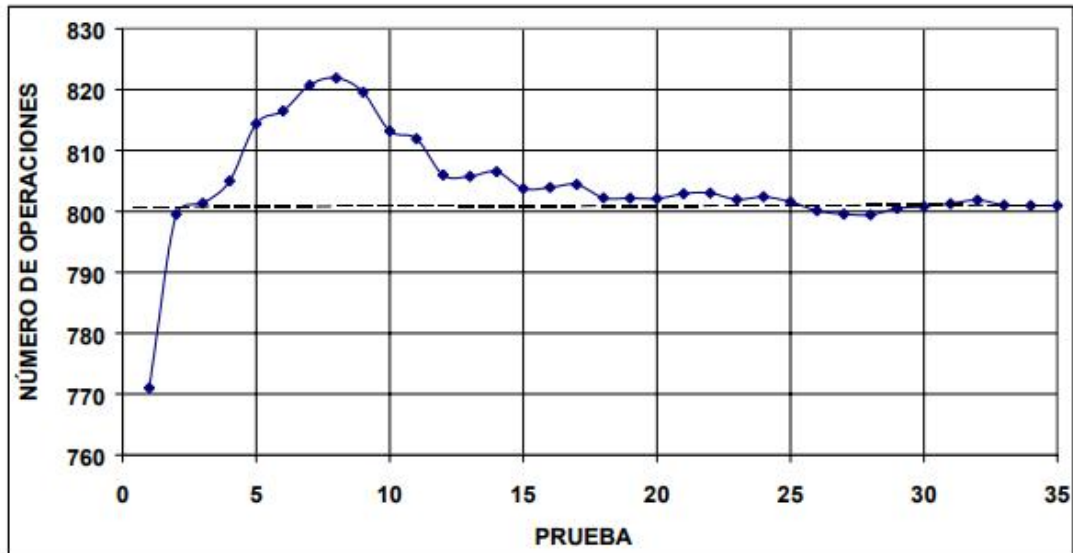
También de estas pruebas piloto, se obtuvieron los porcentajes promedio de operaciones, para cada uno de los principales tipos de aeronaves considerados en el modelo de simulación (véase Tabla 4.1.). Al comparar los valores reales de estos porcentajes, contra los valores promedio generados por el modelo de simulación (véase Tabla 4.1.), se observa cómo estos valores son muy semejantes. De hecho el promedio de las diferencias entre los valores reales y los generados por el modelo de simulación son del orden de 1.5%. Por lo que se puede asumir que el modelo de simulación representa adecuadamente al comportamiento real. Antes de continuar con la fase de validación y verificación del modelo, se debe mencionar que en la Tabla 4.1. se realizaron 35 pruebas piloto, con la intención de explorar también el comportamiento de las respuestas del modelo. Como se observa, en la Figura 4.2., el número de operaciones durante cada simulación de 18 horas de operación, fluctúa arriba y debajo de su valor promedio (igual a 800.94 operaciones, representado con una línea punteada), con una desviación estándar de 25.38 operaciones.

Figura 4.2.
Operaciones terminadas en 35 pruebas piloto, simulando una operación del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, desde las 06:00 y hasta las 24:00 horas.



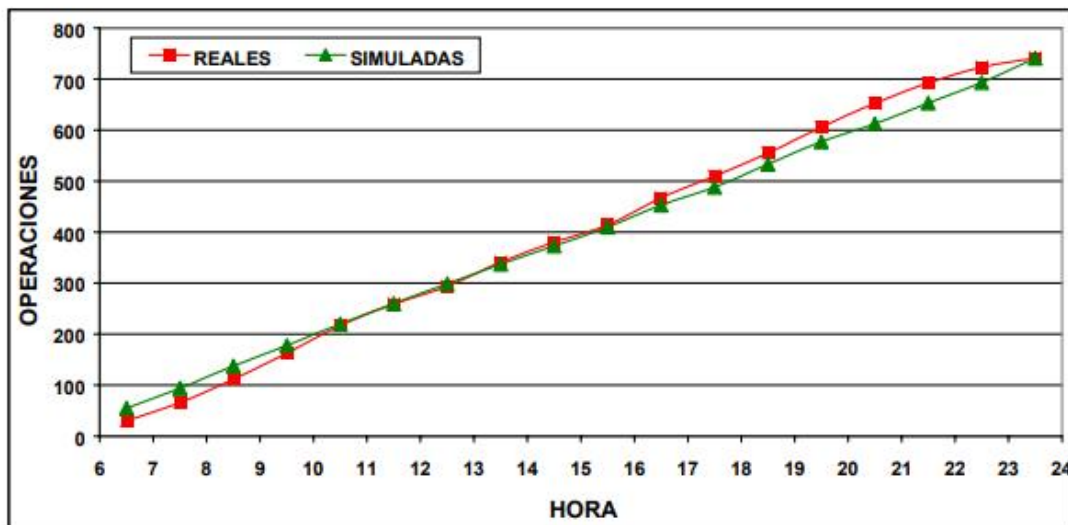
Por otro lado, en la Tabla 4.1. obsérvese como también fue tabulado el valor promedio de operaciones terminadas, para cada una de las pruebas (véase cuarta columna). En la Figura 4.3. se tiene una representación de estos valores. Como se observa en esta figura, el valor promedio obtenido en cada prueba, tiende a converger con el valor promedio de las 35 pruebas piloto. Esta convergencia es poco marcada durante las primeras ocho pruebas, sin embargo, posteriormente esta convergencia tiene más fuerza, por lo que ya en la prueba número veinte el valor promedio de operaciones terminadas, hasta ese momento ($\bar{X}_{20} = 802.10$ operaciones) es muy semejante al que se obtiene en la prueba número 35 ($\bar{X}_{35} = 800.94$ operaciones, véase la línea punteada en la Figura 4.3). Como se observa, la anterior es una forma empírica de estimar el número requerido de pruebas con el propósito de obtener valores representativos del modelo.

Figura 4.3.
Operaciones terminadas promedio, para cada una de las 35 pruebas piloto, simulando una operación del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, desde las 06:00 y hasta las 24:00 horas.



Prosiguiendo con la validación y verificación del modelo, a continuación se procede a comparar los resultados de las operaciones efectuadas (reales) en el aeropuerto de la Ciudad de México, contra las que se obtienen mediante el modelo de simulación propuesto. Para ello en la Figura 4.4. se representan las operaciones acumuladas, durante cada hora de operación del aeropuerto, a partir de la 06:00 horas y hasta las 24:00 horas. Como se observa en esta figura, los resultados del modelo son consistentes con la realidad y también son una representación del modelo conceptual establecido. Con base en todos los resultados anteriores, se termina la validación y verificación del modelo de simulación AICM1, establecido en el Cuadro 4.1.

Figura 4.4.
Operaciones acumuladas, reales y simuladas, para el Aeropuerto
Internacional de la Ciudad de México, a partir de las 06:00 y hasta las 24:00
horas.



5. Consideraciones generales.

En este capítulo se planean los experimentos a realizar con el modelo de simulación establecido en el capítulo anterior. También aquí, se efectúan las “corridas” de simulación necesarias para los experimentos propuestos, con el objeto de obtener los valores de interés; y finalmente se analizan los resultados.

5.1. Efectos del incremento de las operaciones del aeropuerto, como una consecuencia natural del aumento de la demanda de este tipo de servicio.

En este capítulo se realizan cuatro tipos de experimentos, en el primero se evalúa el efecto del incremento de las operaciones en el aeropuerto, como una consecuencia natural del aumento de la demanda de este tipo de servicio. En el segundo experimento se evalúa el efecto del aumento de la capacidad del aeropuerto, lo anterior se basa en la intención de su administración, de aumentar la eficiencia de su infraestructura aeroportuaria, para manejar 60 operaciones por hora. El tercer experimento es el opuesto al anterior, dado

que considera una disminución de la capacidad del aeropuerto debido a labores de mantenimiento en sus pistas. El cuarto experimento, evalúa los efectos producidos por cambios del equipo aéreo actual, por otro de mayor capacidad (de pasajeros). En todos los casos se estiman, mediante el modelo de simulación, los siguientes valores de interés: el tamaño promedio del número de aeronaves en la cola de espera; el tamaño máximo de cola durante la prueba; los tiempos promedio de espera de las aeronaves en la cola, considerando a todas las aeronaves, o considerando sólo a aquellas aeronaves con tiempo de espera distinto de cero; el porcentaje de aeronaves del total, que no tienen que esperar en la cola para ser atendidas, es decir, el porcentaje de aeronaves que al llegar a las pistas son atendidas inmediatamente; y por último también se obtiene la utilización promedio de las pistas durante el tiempo simulado.

Desde luego los experimentos mencionados antes son ilustrativos y no limitativos de la aplicación que se puede dar al modelo de simulación. Existe, por ejemplo, la posibilidad de realizar simulaciones en donde se consideren varios cambios simultáneamente (v.gr. un aumento de la capacidad del aeropuerto y al mismo tiempo una disminución de la actividad aérea) o experimentos distintos, donde se desea saber la respuesta del modelo ante el cambio de ciertos factores. Por otro lado, se debe recordar que las estimaciones que proporciona el modelo de simulación AICM1, asumen la operación del aeropuerto de la Ciudad de México, desde las 06:00 horas y hasta las 24:00 horas (18 horas de simulación). El intervalo entre las 00:00 horas y las 06:00 horas no está considerado, durante este periodo se realizan muy pocas operaciones de aterrizaje y despegue como ya fue señalado antes.

5.2. Efectos del aumento de la capacidad de las pistas del aeropuerto.

Es importante conocer cómo es el comportamiento del aeropuerto de la Ciudad de México, conforme aumenta el número de operaciones en sus pistas, con el objeto de tomar las acciones necesarias para evitar o reducir

sus consecuencias negativas, como son, entre otras, las demoras excesivas, la cancelación de vuelos y los accidentes.

Se supone que al aumentar el número de operaciones en las pistas del aeropuerto, también aumenta el número de aeronaves en las colas de espera, los tiempos de espera y la utilización de las pistas, pero ¿cuál es la magnitud de estos incrementos? Mediante el modelo de simulación establecido, se pueden estimar en forma cuantitativa estos valores.

En las siguientes pruebas, se asume que la capacidad de las pistas del aeropuerto es fija, con un valor igual a 55 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.

Desde luego, es posible considerar cualquier otra capacidad de las pistas del aeropuerto o incrementos de demanda de distinta magnitud para cada tipo de aeronave, para ello sólo es necesario reflejar estos valores en el modelo de simulación ya establecido. Además, se supone que la restricción crítica del aeropuerto está en sus pistas y no en otro lugar (como podrían ser las posiciones de contacto o remotas, las salas de espera, la capacidad para manejo de equipaje, espacios de estacionamiento, etcétera).

Para reflejar los incrementos de la demanda de servicio en el modelo de simulación original, fueron modificados los valores de los tiempos promedio entre llegadas y salidas, dividiéndolos por un factor que permite establecer distintos valores de operaciones generadas, los cuales representan, a su vez, distintos niveles de demanda. El resumen de los resultados de estas pruebas se muestra en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1.
Resumen de los resultados del desempeño del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, ante distintos niveles de demanda de servicio, para una operación diaria desde las 06:00 horas y hasta las 24:00 horas.

NÚMERO DE AERONAVES QUE DEMANDARON SERVICIO	AERONAVES EN LA COLA DE ESPERA		NÚMERO DE AERONAVES CON TIEMPO DE ESPERA IGUAL A CERO (SKIPPING)	NÚMERO DE OPERACIONES REALIZADAS (TERMINATED)	TAMANO PROMEDIO DEL NÚMERO DE AERONAVES EN LA COLA DE ESPERA	TIEMPO PROMEDIO DE TODAS LAS AERONAVES (minutos)	TIEMPO PROMEDIO DE ESPERA CON TIEMPO DISTINTO DE CERO (minutos)	PORCENTAJE DE AERONAVES CON TIEMPO DE ESPERA IGUAL A CERO (%)	UTILIZACIÓN DE LAS PISTAS	TIEMPO DE EJECUCIÓN (minutos)	DIVISOR UTILIZADO PARA LOS TIEMPOS PROMEDIO ENTRE LLEGADAS Y SALIDAS
	QUE ENTRARON (IN)	QUE SALIERON (OUT)	QUE PERMANECIERON (RESIDING)								
884	483	483	0	884	0.88	1.54	2.19	32	0.888	0.22	0.85
885	488	488	0	885	1.53	2.17	2.81	29	0.784	0.32	0.85
890	737	735	2	857	2.43	3.11	3.88	14	0.843	0.35	1.05
916	853	849	4	913	5.16	6.06	6.55	7	0.921	0.37	1.15
980	933	931	2	957	9.19	10.22	10.57	2	0.958	0.37	1.20
986	978	975	3	984	18.88	19.83	20.03	1	0.984	0.38	1.28
1 017	1 018	990	28	990	30.33	31.40	31.53	0	0.998	0.38	1.30
1 077	1 078	990	88	990	48.73	49.70	49.78	0	0.999	0.40	1.35

Fuente: Elaboración propia, con base en el modelo de simulación AICM1 modificado. Los valores para cada nivel de demanda representan promedios de 30 corridas de simulación en cada caso, para más detalles véase texto.

Cabe señalar que con cada uno de los niveles de demanda fueron realizadas 30 corridas de simulación, con la finalidad de obtener estimaciones representativas del comportamiento del aeropuerto. Observe que en la Tabla 5.1. fueron considerados ocho niveles de demanda (véase primera columna), los dos primeros son valores menores a la demanda actual y los dos últimos son valores mayores a la capacidad del aeropuerto (considerando una operación de 18 horas diarias), lo anterior tiene propósitos exploratorios.

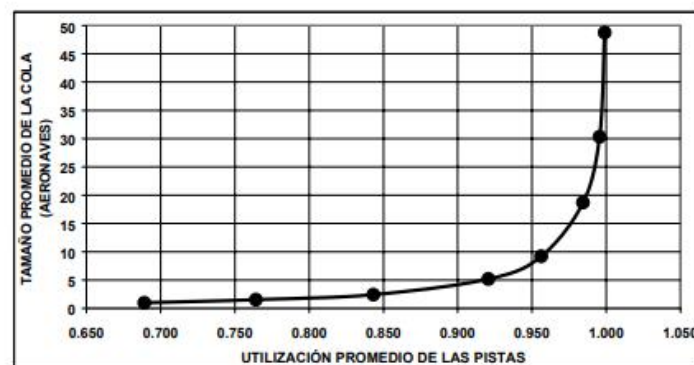
Los niveles de demanda se obtuvieron al aplicar el divisor correspondiente (véase última columna de la tabla) a los tiempos promedio entre llegadas y salidas del modelo original. Como se observa, al incrementarse la demanda del servicio, aumenta también el número de aeronaves atendidas, hasta llegar a un límite (de 990 aeronaves, véase sexta columna), después del cual ya no se pueden atender más aeronaves. Evidentemente, a partir de ese valor límite, el número de aeronaves en la cola de espera aumenta drásticamente. También se observa cómo, al aumentar la demanda de servicio, el número de aeronaves con tiempo de espera igual a cero disminuye, al principio lentamente y después en forma acelerada. Lo anterior refleja un deterioro en el nivel de servicio para las aeronaves (y los pasajeros), dado que cada vez más aeronaves entran a la cola en espera de servicio. En el caso del tamaño promedio de la cola y de los tiempos promedio de espera, también se observan crecimientos lentos al inicio y después acelerados, conforme aumenta la demanda del servicio.

Lo anterior implica, además de un deterioro de la calidad del servicio, dado que se producen vuelos con demoras (lo que a su vez puede incluso generar cancelación de vuelos), un mayor riesgo en la operación aérea, pues al permanecer más aeronaves durante mayor tiempo en las fases de aterrizaje y despegue, los riesgos de accidentes aéreos aumentan. En cuanto a la utilización promedio de las pistas, ésta aumenta con la demanda; sin embargo, los mayores niveles de utilización van acompañados directamente de un deterioro de la calidad de servicio prestado.

Las siguientes ilustraciones muestran gráficamente algunos de los resultados anteriores. En la Figura 5.1. se presenta el comportamiento del tamaño de la

cola de espera, con respecto a la utilización promedio de las pistas. Como se observa, el comportamiento es casi lineal, para valores inferiores a una utilización de aproximadamente 0.850, a partir de ahí, al incrementarse la utilización de las pistas, el tamaño promedio de la cola aumenta en forma marcadamente exponencial.

Figura 5.1
Tamaño promedio del número de aeronaves en la cola de espera, con respecto a la utilización promedio de las pistas del aeropuerto, para una operación diaria desde las 06:00 horas y hasta las 24:00 horas.

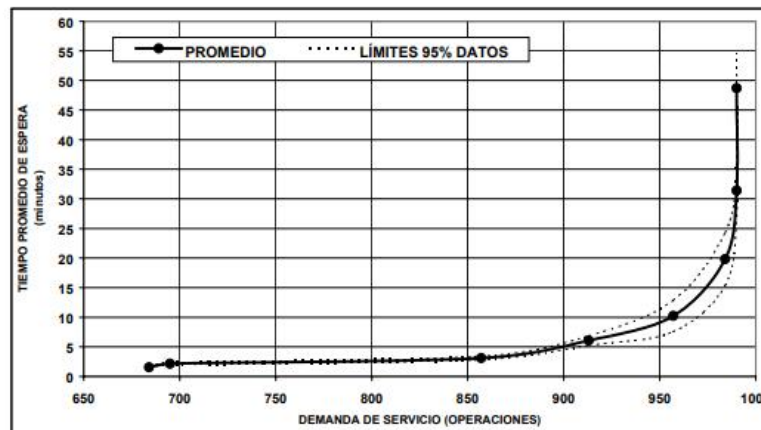


En la Figura 5.2. se muestra el comportamiento de los tiempos promedio de espera de todas las aeronaves, con respecto a las operaciones realizadas en el aeropuerto de la Ciudad de México. La línea continua representa los valores promedio y las líneas punteadas señalan los límites donde se ubica el 95% de los valores individuales de las corridas. Como se observa en esta figura, si se desea mantener un nivel de servicio de vuelos sin demoras (es decir, con tiempos de espera no mayores a 15 minutos), el aeropuerto no puede soportar más de 975 operaciones diarias. Cabe señalar que lo anterior se refiere a tiempos promedio de espera, por lo que si se desea considerar a la mayoría de las aeronaves, se puede asumir como límite el valor superior de la línea punteada de la Figura 5.2., bajo esta condición, el número de operaciones diarias en el aeropuerto de la Ciudad de México, debe ser menor a 965 operaciones para mantener un nivel de servicio de vuelos sin demoras.

Sin embargo, puede ser deseable un mejor nivel de servicio, por ejemplo, uno que no exceda un tiempo promedio de espera de cinco minutos, en tal caso el aeropuerto de la Ciudad de México no puede soportar más de 900 operaciones por día. Como se observa, mediante la Figura 5.2. es posible

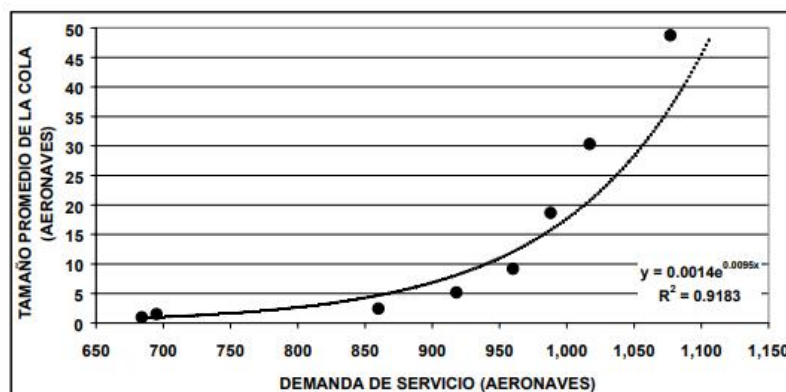
tener un estimado del número de operaciones máximas por día en el aeropuerto para diferentes niveles de servicio, en función de los tiempos promedio de espera de las aeronaves.

Figura 5.2
Tiempos promedio de espera de todas las aeronaves, con respecto a las operaciones realizadas en el aeropuerto, para una operación diaria desde las 06:00 horas y hasta las 24:00 horas.



Los puntos en la Figura 5.3. muestran el comportamiento del tamaño promedio de la cola de espera, para distintos niveles de demanda de servicio, en el aeropuerto de la Ciudad de México. La línea continua representa la tendencia del comportamiento de estos puntos (observe el alto valor del coeficiente de determinación y la ecuación de la línea, que es del tipo exponencial). Observe cómo el tamaño promedio de la cola crece rápidamente cuando la demanda de servicio es mayor a 925 operaciones diarias.

Figura 5.3.
Tamaño promedio del número de aeronaves en la cola de espera, con respecto a la demanda de servicio, para una operación diaria desde las 06:00 horas y hasta las 24:00 horas.



5.3. Efectos de la reducción de la capacidad del aeropuerto, debido a labores de mantenimiento en sus pistas.

La administración del aeropuerto de la Ciudad de México, tiene la intención de aumentar la eficiencia de su infraestructura aeroportuaria, con el objeto de manejar 60 operaciones por hora en sus pistas. Lo anterior implica que las pistas tendrían una capacidad para atender una operación por minuto, por lo que el tiempo de servicio por aeronave tendría también ese valor, en lugar de 1.0909 minutos, que es el tiempo utilizado en el modelo original (el cual corresponde a una capacidad de 55 operaciones por hora). Con la información anterior, se pueden realizar las simulaciones requeridas para poder evaluar los cambios que se presentarían bajo la nueva condición.

En las primeras ocho columnas de la Tabla 5.2. se muestran los resultados de 20 corridas, realizadas para la condición original (utilizando el modelo AICM1). En las restantes columnas de la misma tabla, se muestran los resultados para la nueva condición, con una mayor capacidad de las pistas del aeropuerto. Para ello, en el modelo AICM1, fue necesario cambiar el valor original del campo F2 (1.0909 minutos), del nodo PISTAS*F, por el nuevo valor de 1.0000 minutos.

Resultados del modelo de simulación, considerando dos capacidades distintas de las pistas del aeropuerto (55 y 60 operaciones/hora), para una operación diaria desde las 06:00 horas y hasta las 24:00 horas.

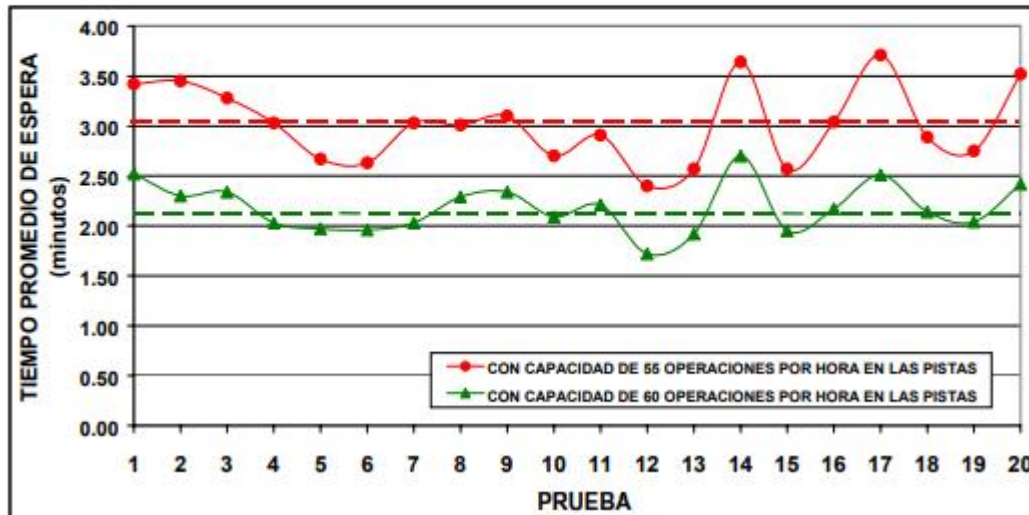
PRUEBA	NÚMERO ALEATORIO UTILIZADO	CON CARPACORNO EN LAS PRISTAS DE 55 OPERACIONES/HORA					CON CARPACORNO EN LAS PRISTAS DE 10 OPERACIONES/HORA						
		TAMAYO PROMEDIO DEL NÚMERO DE AERONAVES EN LA COLA DE ESPERA	TAMAYO MÁXIMO DE COLA DURANTE LA PRUEBA	TIEMPOS PROMEDIO DE AERONAVES (minutos)	DE TODAS LAS AERONAVES	DE AERONAVES CON TIEMPO DE ESPERA IGUAL A CERO (%)	UTILIZACIÓN PROMEDIO DE LAS PRISTAS	TAMAYO PROMEDIO DEL NÚMERO DE AERONAVES EN LA COLA DE ESPERA	TAMAYO MÁXIMO DE COLA DURANTE LA PRUEBA	TIEMPOS PROMEDIO DE AERONAVES (minutos)	DE TODAS LAS AERONAVES	DE AERONAVES CON TIEMPO DE ESPERA IGUAL A CERO (%)	UTILIZACIÓN PROMEDIO DE LAS PRISTAS
1	43	2.25	10	2.80	3.42	16.10	0.8557	1.52	10	1.94	2.52	23.23	0.7844
2	18	2.10	14	2.84	3.45	17.75	0.8085	1.31	12	1.77	2.30	23.00	0.7383
3	48	1.85	10	2.84	3.28	19.55	0.8044	1.28	15	1.73	2.34	20.19	0.7373
4	49	1.84	13	2.48	1.84	17.57	0.8044	1.12	13	1.52	2.04	24.87	0.7363
5	16	1.48	11	2.09	2.87	21.88	0.7724	1.01	11	1.43	1.87	27.48	0.7082
6	21	1.85	14	2.14	2.83	18.34	0.8388	1.12	14	1.45	1.88	25.61	0.7672
7	49	1.84	13	2.49	3.03	17.57	0.8044	1.20	13	1.52	2.03	24.87	0.7383
8	29	1.89	14	2.53	3.01	15.82	0.8152	1.29	12	1.73	2.29	24.38	0.7475
9	40	1.83	13	2.50	3.10	19.34	0.7878	1.25	13	1.70	2.34	27.43	0.7315
10	17	1.50	16	2.10	2.70	22.05	0.7781	1.08	18	1.48	2.09	28.78	0.7143
11	4	2.00	11	2.52	2.81	13.35	0.8595	1.39	11	1.72	2.21	22.01	0.7887
12	41	1.50	11	1.88	2.40	17.40	0.8233	0.89	11	1.31	1.72	23.80	0.7547
13	15	1.52	11	2.04	2.57	20.47	0.8132	1.04	11	1.38	1.92	24.72	0.7454
14	8	2.02	18	2.88	3.84	20.85	0.7858	1.38	13	1.83	2.70	28.58	0.7019
15	47	1.43	12	1.88	2.57	22.82	0.7845	1.01	12	1.40	1.95	28.30	0.7302
16	20	1.84	14	2.34	3.04	22.88	0.7578	1.11	12	1.58	2.17	27.21	0.8888
17	37	2.20	13	3.04	3.71	18.08	0.7874	1.38	11	1.81	2.51	23.87	0.7218
18	10	1.67	18	2.27	2.89	21.31	0.8003	1.15	18	1.57	2.14	28.81	0.7338
19	22	1.82	13	2.24	2.75	18.80	0.7880	1.08	11	1.50	2.04	28.80	0.7234
20	46	2.06	13	2.82	3.52	19.72	0.7944	1.29	12	1.77	2.42	28.54	0.7283
PROMEDIO DESVIACIÓN		1.80	13.60	2.44	3.02	18.12	0.8036	1.20	12.75	1.82	2.18	26.75	0.7381
		0.26	1.88	0.33	0.38	2.51	0.0208	0.15	1.77	0.18	0.24	1.88	0.0245

Notas:

Tabla B.1. del Anexo B.

Un aumento de la capacidad de las pistas de 55 operaciones/hora a 60 operaciones/hora, produce un incremento de la capacidad del orden de 9%. De acuerdo con las estimaciones del modelo de simulación, este aumento de la capacidad de las pistas se traduce en una disminución de mayor magnitud (33.3%), en el tamaño promedio del número de aeronaves en la cola de espera, puesto que disminuye de 1.8 a 1.2 aeronaves. También hay una notable reducción en los tiempos promedio de espera de todas las aeronaves del 33.6% (baja de 2.44 a 1.62 minutos) y, en el caso de las aeronaves con tiempo de espera distinto de cero, la disminución es de 27.8% (baja de 3.02 a 2.18 minutos). La utilización promedio de las pistas disminuye un 8.28% (baja de 0.8026 a 0.7361), debido a que se proporciona un servicio más rápido a las aeronaves. Un efecto menos acentuado, del aumento de la capacidad de las pistas, se observa en el porcentaje de aeronaves con tiempo de espera igual a cero, ya que éste aumenta de 19.12% a 25.75% (aumento del 6.63%). Por último, el menor efecto benéfico se presenta en el tamaño máximo de cola observado, ya que su valor promedio disminuye de 13.6 a 12.75 aeronaves (reducción del 6.25%). Con fines ilustrativos, en la Figura 5.4. se muestra gráficamente una de las seis comparaciones que se mencionaron antes. En particular, se muestran los resultados de las pruebas para el caso del tiempo promedio de espera de las aeronaves que hacen cola antes de ser atendidas. Las líneas punteadas en la figura, representan los valores promedio de las dos distintas capacidades de las pistas.

Figura 5.4.
Tiempo promedio de espera de las aeronaves que hacen cola antes de ser atendidas, para dos capacidades distintas de las pistas del aeropuerto, considerando una operación diaria desde las 06:00 horas y hasta las 24:00 horas.



5.4. Efectos originados al reducirse la demanda de servicio, debido a la utilización de aeronaves de mayor capacidad.

Regularmente cada año, de manera alternada, las pistas del aeropuerto de la Ciudad de México son sujetas a labores de mantenimiento, en consecuencia, durante esos días el aeropuerto da servicio con una sola pista. Esta situación origina que la capacidad del aeropuerto disminuya en aproximadamente nueve operaciones por hora, con respecto a su capacidad normal. Es decir, su capacidad se reduce de 55 a 46 operaciones/hora. Con esta información y utilizando el modelo de simulación establecido, se evalúan a continuación los efectos de esta reducción en la capacidad de las pistas del aeropuerto. Se asume que la condición inicial del aeropuerto corresponde a una capacidad de 55 operaciones/hora, por lo que el tiempo de servicio por aeronave es de 1.0909 minutos; por otro lado, la condición de menor capacidad, debida a las labores de mantenimiento de una de las dos pistas, corresponde a una capacidad de 46 operaciones/hora, la cual implica un tiempo de servicio por aeronave de 1.3043 minutos. Para cada uno de estos dos tiempos de servicio

fueron realizadas 30 corridas de simulación, con el modelo AICM1 modificado. El resumen de los resultados de estas pruebas se muestra en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3.
Resultados del modelo de simulación, considerando dos capacidades distintas del aeropuerto (55 y 46 operaciones/hora), para una operación diaria desde las 06:00 horas y hasta las 24:00 horas.

CAPACIDAD DE LAS PISTAS (operaciones/hora)	TAMAÑO PROMEDIO DE LA COLA DE ESPERA (aeronaves)	TAMAÑO MÁXIMO DE COLA DURANTE LA PRUEBA (aeronaves)	TIEMPOS PROMEDIO DE ESPERA		PORCENTAJE DE AERONAVES CON TIEMPO DE ESPERA IGUAL A CERO (%)	UTILIZACIÓN PROMEDIO DE LAS PISTAS
			DE TODAS LAS AERONAVES (minutos)	DE AERONAVES CON TIEMPO DE ESPERA DISTINTO DE CERO (minutos)		
55	1.82	19	2.46	3.06	17	0.8024
46	8.34	41	11.14	11.59	2	0.9518

Aunque la reducción en la capacidad de las pistas aparentemente no es significativa (9 operaciones/hora), el modelo de simulación muestra que se presentarán grandes impactos negativos durante la operación del aeropuerto, cuando se disminuye su capacidad, debido a las labores de mantenimiento en alguna de sus dos pistas. Una disminución de la capacidad de las pistas de 55 a 46 operaciones/hora, significa un decremento de la capacidad del orden de 16%. De acuerdo con las estimaciones del modelo de simulación, este decremento implica un incremento de mucho mayor magnitud (358.2%) en el número promedio de aeronaves en la cola de espera, puesto que aumenta de 1.82 a 8.34 aeronaves. También hay un notable incremento del 352.8% en el tiempo promedio de espera de todas las aeronaves (sube de 2.46 a 11.14 minutos). En el caso de las aeronaves con tiempo de espera distinto de cero, el incremento es de un 278.7% (sube de 3.06 a 11.59 minutos). También se estima un incremento importante en el tamaño máximo de cola observado, ya que su valor promedio aumentó de 19 a 41 aeronaves (aumento del 115.7%). Un efecto menos acentuado de la disminución de la capacidad de las pistas, se observa en la utilización promedio de éstas, debido a que se proporciona un servicio menos rápido a las aeronaves, las pistas del aeropuerto son utilizadas más tiempo, por lo que este valor sube de 0.8024 a 0.9518 (aumenta 18.61%). Por último, el menor efecto de la disminución de la capacidad de las pistas se presenta en el porcentaje de

aeronaves con tiempo de espera igual a cero, así este valor disminuye de 17% a 2% (disminución del 15%).

En la simulación anterior se considera que no hay cancelación de vuelos y que las aeronaves no son canalizadas a aeropuertos alternos, sin embargo, es posible asumir ambos supuestos en el modelo de simulación, incrementando los valores de los tiempos promedio entre salidas (para considerar la cancelación de vuelos) y de llegadas de aeronaves (para asumir la canalización de aeronaves hacia aeropuertos alternos).

5.5. Comentarios finales sobre los experimentos realizados.

Para mostrar las capacidades del modelo propuesto, en este apartado se considerará que un tipo específico de aeronave utilizada actualmente es reemplazada por otro tipo de aeronave de mayor capacidad de pasajeros. De esta forma, se asumirá que se transporta a una misma cantidad de pasajeros, pero se requiere un menor número de operaciones de aterrizaje y despegue, puesto que las nuevas aeronaves pueden llevar más pasajeros en un mismo ciclo. Aunque en las simulaciones que se realizan a continuación sólo se considera el cambio de un sólo tipo de aeronave por otro, el modelo de simulación AICM1, permite realizar esta consideración con varios tipos de aeronaves en forma simultánea. Para ello, en el modelo original se deben reemplazar los valores exponenciales de los tiempos promedio entre llegadas y salidas (de las fuentes) de las aeronaves a substituir, por los nuevos valores que correspondan a las aeronaves substitutas.

Asúmase que todas las aerolíneas que operan aeronaves ATR-42, en el aeropuerto de la Ciudad de México, deciden cambiar (por factores económicos) este tipo de aeronave por otras del tipo ATR-72 (véase Figura 5.5.). Estas últimas son aeronaves del mismo fabricante, pero de mayor capacidad en pasajeros.

Figura 5.5.
Aeronaves ATR-42 (a la izquierda) y ATR-72 (a la derecha).



Se considerará que la capacidad de las aeronaves actuales (ATR-42) es de 42 pasajeros, mientras que la de las nuevas aeronaves a utilizar (ATR-72) es de 74 pasajeros. Por lo que la capacidad en pasajeros de la aeronave ATR-42 es tan sólo el 56.75%, en relación con la aeronave ATR-72. Por ello, el número de operaciones requeridas para mover a un mismo número de pasajeros con las aeronaves ATR-72, es un 43.25% menor ($100\% - 56.75\%$) que las operaciones realizadas con las aeronaves ATR-42.

En la Tabla 5.4. se establecen los resultados del modelo de simulación antes del cambio de aeronaves (condición actual). En esta condición, se observa un valor promedio de 94.4 operaciones de aeronaves ATR-42 (durante un periodo de operación simulado de 18 horas). Sin embargo, las aeronaves ATR-72, para transportar el mismo número de pasajeros, sólo requieren realizar en promedio 53.5 operaciones ($=94.4 - (94.4 \times 0.4325)$). Para incorporar esta condición, se debe modificar el modelo de simulación AICM1, aumentando los valores exponenciales de los tiempos promedio entre llegadas y salidas (de las aeronaves ATR-42), de tal forma que en promedio se produzca un número de operaciones igual a la señalada antes (53.5 operaciones).

Después de tres pruebas preliminares se logró esto, para ello los valores exponenciales de los tiempos promedio entre llegadas y salidas aumentaron al valor de 40.9754 minutos, en ambos casos. Con estos nuevos valores en el modelo de simulación modificado se realizaron veinte “corridas”, los resultados se muestran en la Tabla 5.5.

Tabla 5.4.
Resultados del modelo de simulación, para la condición original, antes de
cambiar las aeronaves ATR-42 por las ATR-72, para una operación diaria
desde las 06:00 horas y hasta las 24:00 horas.

PRUEBA	NÚMERO ALEATORIO UTILIZADO	TAMAÑO PROMEDIO DEL NÚMERO DE AERONAVES EN LA COLA DE ESPERA	TAMAÑO MÁXIMO DE COLA DURANTE LA PRUEBA	TIEMPOS PROMEDIO DE ESPERA		PORCENTAJE DE AERONAVES CON TIEMPO DE ESPERA IGUAL A CERO (%)	UTILIZACIÓN PROMEDIO DE LAS PISTAS	OPERACIONES DE AERONAVES ATR-42
				DE TODAS LAS AERONAVES (minutos)	DE AERONAVES CON TIEMPO DE ESPERA DISTINTO DE CERO (minutos)			
1	43	2.25	16	2.86	3.42	16.16	0.8557	93
2	18	2.10	14	2.84	3.45	17.75	0.8065	90
3	-48	1.95	16	2.64	3.28	19.55	0.8044	97
4	49	1.84	13	2.49	3.03	17.57	0.8044	96
5	16	1.48	11	2.09	2.67	21.86	0.7724	100
6	-21	1.65	14	2.14	2.63	18.58	0.8368	108
7	49	1.84	13	2.49	3.03	17.57	0.8044	96
8	-29	1.89	14	2.53	3.01	15.92	0.8152	103
9	40	1.83	13	2.50	3.10	19.34	0.7976	104
10	17	1.50	16	2.10	2.70	22.05	0.7791	91
11	-4	2.00	11	2.52	2.91	13.35	0.8595	95
12	-41	1.50	11	1.98	2.40	17.40	0.8233	88
13	15	1.52	11	2.04	2.57	20.47	0.8132	97
14	9	2.02	18	2.88	3.64	20.95	0.7656	70
15	-47	1.43	12	1.98	2.57	22.92	0.7845	89
16	20	1.64	14	2.34	3.04	22.99	0.7578	100
17	-37	2.20	13	3.04	3.71	18.08	0.7874	92
18	-10	1.67	16	2.27	2.89	21.31	0.8003	92
19	-22	1.62	13	2.24	2.75	18.80	0.7890	93
20	-46	2.06	13	2.82	3.52	19.72	0.7944	94
PROMEDIO		1.80	13.60	2.44	3.02	19.12	0.8026	94.4
DESVIACIÓN ESTÁNDAR		0.26	1.98	0.33	0.38	2.51	0.0268	7.76

Cabe señalar que un estimado de los valores de los tiempos promedio entre llegadas y salidas requeridos, por el nuevo tipo de aeronave, se puede obtener si se asume en primer lugar que este tiempo tiene el mismo valor, tanto para los aterrizajes como para los despegues (asúmase que tiene el valor t_x). Dado que se conoce el valor del tiempo de simulación, en nuestro caso 1080 minutos, y el número de operaciones de las nuevas aeronaves durante el tiempo de la simulación (53.5 operaciones), entonces: $t_x = (2 \times 1,080) / 53.5 = 40.3738$ minutos/operación, el cual, como se observa, es un valor muy cercano al utilizado en el modelo modificado. De hecho, a partir de este valor, se realizaron dos iteraciones con el modelo de simulación para obtener el valor exacto de estos tiempos.

Tabla 5.5.
Resultados con el modelo de simulación modificado, en donde se han
sustituido las aeronaves ATR-42 por las ATR-72, para una operación diaria
desde las 06:00 horas y hasta las 24:00 horas.

PRUEBA	NÚMERO ALEATORIO UTILIZADO	TAMAÑO PROMEDIO DEL NÚMERO DE AERONAVES EN LA COLA DE ESPERA	TAMAÑO MÁXIMO DE COLA DURANTE LA PRUEBA	TIEMPOS PROMEDIO DE ESPERA		PORCENTAJE DE AERONAVES CON TIEMPO DE ESPERA DISTINTO DE CERO (minutos)	UTILIZACIÓN PROMEDIO DE LAS PISTAS	OPERACIONES DE AERONAVES ATR-72
				DE TODAS LAS AERONAVES (minutos)	DE AERONAVES CON TIEMPO DE ESPERA DISTINTO DE CERO (minutos)			
1	43	1.84	16	2.47	3.04	18.63	0.8112	44
2	18	1.64	12	2.29	2.87	20.26	0.7819	57
3	-48	1.38	15	1.96	2.59	24.27	0.7637	63
4	49	1.32	13	1.89	2.45	22.74	0.7588	51
5	16	1.05	11	1.55	2.09	25.61	0.7405	53
6	-21	1.45	14	1.98	2.52	21.44	0.7976	66
7	49	1.32	13	1.89	2.45	22.74	0.7588	51
8	-29	1.67	12	2.33	2.86	18.60	0.7804	54
9	40	1.56	13	2.24	2.86	21.84	0.7543	50
10	17	1.40	16	2.07	2.77	25.31	0.7340	48
11	-4	1.56	11	2.09	2.53	17.64	0.8129	62
12	-41	1.19	11	1.63	2.06	20.56	0.7877	58
13	15	1.19	11	1.70	2.26	24.87	0.7617	53
14	9	1.69	16	2.54	3.39	25.10	0.7235	47
15	-47	1.24	12	1.82	2.38	23.61	0.7466	46
16	20	1.14	12	1.76	2.49	29.43	0.7063	37
17	-37	1.66	12	2.39	3.01	20.43	0.7557	51
18	-10	1.39	16	1.99	2.67	25.46	0.7612	54
19	-22	1.15	11	1.69	2.27	25.75	0.7396	64
20	-46	1.49	12	2.14	2.79	23.14	0.7560	60
PROMEDIO		1.42	12.95	2.02	2.62	22.87	0.7616	53.5
DESVIACIÓN ESTÁNDAR		0.22	1.88	0.29	0.34	2.97	0.0275	7.35

Al comparar los valores promedio de las Tablas 5.4 y 5.5, se observa que el principal beneficio del cambio del equipo aéreo, se manifiesta en una reducción de los tamaños promedio de las colas de espera, puesto que se reducen en un 21.1% (pasa de 1.8 a 1.42 aeronaves); también se destaca una reducción importante en los tiempos promedio de espera, tanto para todas las aeronaves, con una reducción del 17.2% (disminuye de 2.44 a 2.02 minutos), como en los tiempos de espera de las aeronaves que hacen cola, con una disminución del 13.2% (baja de 3.02 a 2.62 minutos). Puesto que se realizan menos operaciones aéreas, la utilización de las pistas disminuye un 5.1% (pasa de 0.8026 a 0.7616), el tamaño máximo de cola disminuye un 4.7% (pasa de 13.6 a 12.95 aeronaves) y el menor efecto benéfico se observa en un ligero aumento, del 3.75%, de las aeronaves que no tienen que hacer cola para ser atendidas en las pistas (aumenta de 19.12 a 22.87%).

6. Variante del modelo de simulación, para el análisis de las operaciones por tipo de vuelo nacional o internacional.

En este capítulo se desarrolla una variante del modelo de simulación, que hace una distinción entre los vuelos nacionales de los internacionales. Para ello, se sigue la estructura del modelo original desarrollado en los capítulos anteriores. En la parte final de este capítulo se realizan dos experimentos, con el propósito de evaluar los efectos de trasladar los vuelos nacionales o internacionales del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México hacia otros aeropuertos.

6.1. Formulación del problema y conceptualización del modelo.

Con el objeto de poder evaluar el comportamiento del aeropuerto de la Ciudad de México si sólo diera servicio a los vuelos nacionales o a los internacionales, a continuación se realiza una variante del modelo original (AICM1).

Al igual que en el modelo original, se puede asumir que el sistema de interés está formado por un conjunto de aeronaves en el aire que solicitan permiso para aterrizar y otro conjunto de aeronaves en tierra, que solicitan permiso para despegar. Ambos conjuntos de aeronaves, están ordenados en una secuencia definida, de acuerdo con el momento en que solicitaron su servicio (FIFO). También se asumirá para propósitos del modelo, que existe sólo una pista, pero con la capacidad de ambas.

Dado que este modelo podrá diferenciar a los vuelos nacionales de los internacionales, y a los principales tipos de aeronaves que operan en el aeropuerto, esta clasificación se realizará tanto para las aeronaves que solicitan aterrizar como para las que requieren despegar.

Además, puesto que el orden de atención de las aeronaves es establecido por el orden en que se solicita el servicio, se puede considerar que ambos grupos de aeronaves forman una sola cola imaginaria.

Nuevamente serán utilizados los minutos como las unidades de los tiempos promedio entre llegadas y salidas de las aeronaves, así como para sus tiempos de servicio.

La idea anterior lleva al desarrollo de la Figura 6.1., que muestra esquemáticamente al modelo conceptual del sistema bajo estudio.

Figura 6.1.
Modelo conceptual del sistema que representa a las operaciones de aterrizaje y despegue, diferenciando a los vuelos nacionales de los internacionales y a los principales tipos de aeronaves del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México.



Al igual que en el modelo original, con base en los tiempos de llegada y salida de aeronaves al aeropuerto de la Ciudad de México, es posible obtener una función de densidad de probabilidad (fdp) empírica de los tiempos entre llegadas y entre salidas de las aeronaves; pero ahora diferenciando a los vuelos nacionales de los internacionales, con el objeto de posteriormente determinar funciones de densidad de probabilidad teóricas que describan dichos comportamientos. Estas fdp teóricas serán utilizadas posteriormente para el desarrollo del modelo de simulación en un programa de computadora. En este trabajo, con base en información proporcionada por SENEAM, se obtuvieron los tiempos entre llegada y entre salida de los principales tipos de aeronaves que operan en el AICM, diferenciando a los vuelos nacionales de

los internacionales (para un día típico del mes de enero del año 2000). Debido a que se realizan muy pocas operaciones aéreas durante las primeras seis horas del día, este intervalo no fue considerado en los siguientes cálculos. Bajo la consideración anterior, y con base en los tiempos entre llegadas y entre salidas, para cada uno de los principales tipos de aeronaves, y al aplicar las pruebas de bondad de ajuste, se pudo probar que las fdp empíricas se pueden modelar mediante fdp teóricas del tipo exponencial, tanto con la prueba de Kolmogorov-Smirnov como con la de chi-cuadrada. Aunque todos los cálculos anteriores se efectuaron para un tipo de distribución exponencial, también se realizaron pruebas con otros tipos de distribuciones. Sin embargo, la distribución exponencial fue la que mejor se ajustó a las pruebas de bondad, enseguida estuvo la distribución gamma, después la distribución chi-cuadrada y finalmente la rectangular.

En las Tablas 6.1. y 6.2. se muestra un resumen de los principales resultados obtenidos durante el análisis de las distribuciones empíricas. Dentro de éstas se muestran los valores de las tasas de llegada y salida por unidad de tiempo, los tiempos promedios entre llegadas y entre salidas, y los valores observados y críticos de las pruebas de bondad de ajuste, para cada uno de los principales tipos de aeronaves que operan en el aeropuerto de la Ciudad de México.

Tabla 6.1.
Resumen de los resultados de la distribución exponencial empírica de los aterrizajes de aeronaves, para vuelos nacionales e internacionales, considerando una operación diaria desde las 6:00 horas y hasta las 24:00 horas, en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México.

TIPO DE VUELO	TIPO DE AERONAVE	λ TASA DE LLEGADA DE AERONAVES POR UNIDAD DE TIEMPO (minutos ⁻¹)	$1/\lambda$ TIEMPO PROMEDIO ENTRE LLEGADA DE AERONAVES (minutos)	PRUEBA KOLMOGOROV-SMIRNOV			PRUEBA CHI-CUADRADA		
				N NÚMERO DE OBSERV.	D MAYOR DESVIACIÓN OBSERVADA	$D_{0.05}$ VALOR CRÍTICO	GRADOS DE LIBERTAD	χ^2 VALOR OBSERVADO	$\chi^2_{0.05}$ VALOR CRÍTICO
Nacional	MD-80	0.049111	20.3620	47	0.05894	0.19837	2	0.950	5.991
	DC-9	0.070175	14.2501	68	0.04828	0.16492	4	6.196	9.488
	Boeing 727	0.045275	22.0872	46	0.07065	0.20052	2	1.041	5.991
	F-100	0.048314	20.8979	43	0.09832	0.20739	4	9.301	9.488
	Otros	0.068635	14.5698	79	0.03896	0.15301	3	1.321	7.815
Internacional	Todos	0.083895	11.9197	87	0.07182	0.14580	2	3.020	5.991

Nótese cómo en todas las pruebas de bondad de ajuste, se cumple que los valores observados de la desviación D y χ^2 son menores que los valores críticos, por lo que en todos los casos se acepta la hipótesis de que los

valores se extraen de una fdp exponencial hipotética. Observe también en estas tablas, que para los vuelos nacionales se consideraron cuatro principales tipos de aeronaves, y una quinta clasificación para los otros tipos. En cambio, para los vuelos internacionales, dado que representan una menor proporción de las operaciones aéreas (cerca del 23%), sólo se establece una categoría, que incluye a todos los tipos de aeronaves. Todo lo anterior aplica tanto a los aterrizajes como a los despegues.

Tabla 6.2.
Resumen de los resultados de la distribución exponencial empírica de los despegues de aeronaves, para vuelos nacionales e internacionales, considerando una operación diaria desde las 6:00 horas y hasta las 24:00 horas, en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México.

TIPO DE VUELO	TIPO DE AERONAVE	λ TASA DE SALIDA DE AERONAVES POR UNIDAD DE TIEMPO (minutos ⁻¹)	I.O. TIEMPO PROMEDIO ENTRE SALIDA DE AERONAVES (minutos)	PRUEBA KOLMOGOROV-SMIRNOV			PRUEBA CHI-CUADRADA		
				N NÚMERO DE OBSERV.	D MAYOR DESVIACIÓN OBSERVADA	D _{0.05} VALOR CRÍTICO	GRADOS DE LIBERTAD	X ² VALOR OBSERVADO	X ² _{0.05} VALOR CRÍTICO
Nacional	MD-80	0.054662	18.2942	51	0.05675	0.19043	2	2.882	5.991
	DC-9	0.076662	13.0443	68	0.02465	0.16492	4	2.924	9.488
	Boeing 727	0.042137	23.7321	41	0.07077	0.21239	2	1.348	5.991
	F-100	0.046106	21.6892	45	0.04066	0.20273	4	1.205	9.488
	Otros	0.061735	12.2347	81	0.08428	0.15111	4	5.377	9.488
Internacional	Todos	0.071889	13.9103	78	0.01314	0.15398	2	0.181	5.991

6.2. Construcción, validación y verificación del modelo de simulación.

Inicialmente se debe representar, mediante un diagrama de flujo, la red que describe los movimientos de las operaciones de aeronaves en el aeropuerto de la Ciudad de México. Para ello, tomando como guía al modelo conceptual establecido en la Figura 6.1., se construyó el diagrama mostrado en la Figura 6.2. La simbología utilizada en esta figura es la establecida por el ambiente de simulación SIMNET II. A este modelo de simulación, para diferenciarlo del modelo original (AICM1), se le llamó AICM2.

En el extremo izquierdo de la Figura 6.2., se observa un conjunto de doce nodos fuente que generan los aterrizajes y despegues de aeronaves; debajo de cada uno de estos nodos está indicado su nombre respectivo, el cual, en el caso de los aterrizajes empieza con una letra "A" y en el caso de los despegues con una letra "D". Después de las letras "A" o "D", se indica si la

operación corresponde a un vuelo nacional o internacional, mediante una letra “N” o “I” respectivamente y finalmente se indica el tipo de aeronave para cada una de las doce fuentes representadas. También debe observarse cómo al final de cada nombre de las fuentes aparece la terminación “*S”, la cual indica que se trata de un nodo fuente (SOURCE). Dentro del símbolo de cada nodo fuente (en su parte superior izquierda) se observan las letras “EX” y una cifra entre paréntesis, lo cual indica que la generación de aterrizajes o despegues, en dichos nodos, tiene una distribución exponencial con un valor, expresado en minutos, igual a la cifra entre paréntesis. Cabe señalar que estos valores corresponden a los tiempos promedio entre llegadas y entre salidas de aeronaves, establecidos en las Tablas 6.1. y 6.2.

Después de cada nodo fuente se indica, con una flecha, la dirección hacia la que se dirigen las operaciones generadas, en nuestro caso todas las operaciones provenientes de los nodos fuente van a un nodo común, conocido como nodo cola. El nombre asignado al nodo cola es “COLTOT*Q”, lo cual quiere decir que se trata de la cola total de las operaciones de aterrizaje y despegue, la terminación de este nombre, “*Q”, sirve para designar a cualquier nodo cola (QUEUE). Obsérvese que dentro del símbolo del nodo cola hay tres cajones, que representan a tres campos de este nodo, el primer campo de izquierda a derecha, indica el tamaño máximo de la cola, en este caso se decidió utilizar un tamaño infinito (∞), con el objeto de poder registrar cualquier tamaño de cola durante las simulaciones; el segundo campo indica el número de transacciones entrantes por cada transacción que sale, en el caso bajo estudio es igual a 1; y en el tercer campo se registra la disciplina que sigue la cola, como ya fue señalado en el caso de las operaciones aéreas se sigue la disciplina FIFO.

Posteriormente, todas las transacciones (aterrizajes y despegues) que salen del nodo cola, “COLTOT*Q”, se dirigen al nodo instalación, que se ha identificado con el nombre “PISTAS*F”, el cual representa a las pistas del aeropuerto. La terminación del nombre, “*F”, indica que se trata de un nodo tipo instalación (FACILITY). Dentro del símbolo de este nodo se ubican dos campos, el de la mitad superior indica el tiempo, en minutos, que dura cada servicio en las pistas. Dado que la capacidad del conjunto de las dos pistas

del aeropuerto de la Ciudad de México, es igual a 55 operaciones por hora, cada operación completa se efectúa en 1.0909 minutos. Por otro lado el campo situado en la mitad inferior del símbolo del nodo PISTAS*F, representa al número de servidores en paralelo, en nuestro caso es igual a 1.

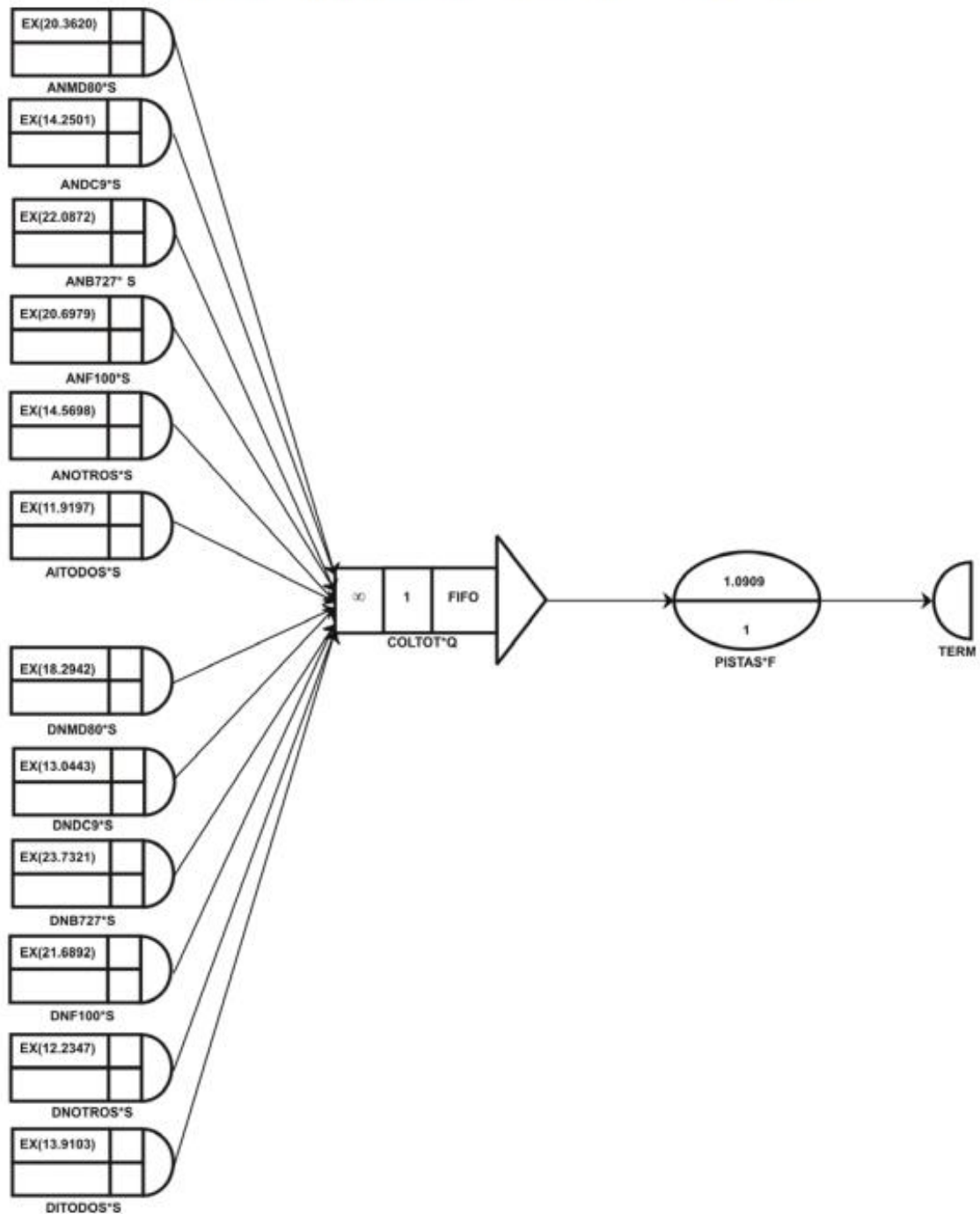
Después que cada transacción (aterrizaje o despegue) ha pasado por el nodo PISTAS*F, termina su actividad, lo cual en la Figura 6.2. se representa mediante un símbolo en forma de medio círculo y se le da el nombre de TERM.

Con base en el diagrama de flujo de la Figura 6.2. es posible codificar el modelo del sistema bajo estudio, en el ambiente de simulación SIMNET II (véase Cuadro 6.1.). Sin embargo, hay que señalar antes las condiciones de entrada e iniciales. En cuanto a la estimación de los requisitos de memoria en los archivos del modelo (DIMENSION;ENTITY), se asumió que no habría más de 790 operaciones en el sistema en cualquier momento (véase el segundo renglón de la codificación). La segunda condición importante es la relacionada con la duración del tiempo que se desea simular. Esta condición se establece en el penúltimo renglón de la codificación, mediante el término definido como "\$RUN-LENGTH=". El valor que se indique después del signo igual, representa el tiempo en minutos que se desea simular. En la codificación mostrada en el Cuadro 6.1., se estableció un tiempo de simulación igual a 18 horas, es decir 1,080 minutos (de las 06:00 a las 24:00 horas).

Cuadro 6.1.
Programa del modelo de simulación AICM2.

```
$PROJECT;AICM2;04/JUN/01;ALFONSO HERRERA:
$DIMENSION;ENTITY(790):
$BEGIN:
  ANMD80*S;EX(20.3620);GOTO-COLTOT:
  ANDC9*S;EX(14.2501);GOTO-COLTOT:
  ANB727*S;EX(22.0872);GOTO-COLTOT:
  ANF100*S;EX(20.6979);GOTO-COLTOT:
  ANOTROS*S;EX(14.5698);GOTO-COLTOT:
  AITODOS*S;EX(11.9197);GOTO-COLTOT:
  DNMD80*S;EX(18.2942);GOTO-COLTOT:
  DNDC9*S;EX(13.0443);GOTO-COLTOT:
  DNB727*S;EX(23.7321);GOTO-COLTOT:
  DNF100*S;EX(21.6892);GOTO-COLTOT:
  DNOTROS*S;EX(12.2347);GOTO-COLTOT:
  DITODOS*S;EX(13.9103);GOTO-COLTOT:
  COLTOT*Q;GOTO-PISTAS:
  PISTAS*F;;1.0909;*TERM:
$END:
$RUN-LENGTH=1080:
$RUNS=01:
$STOP:
```

Figura 6.2.
Diagrama de flujo del modelo de simulación AICM2.

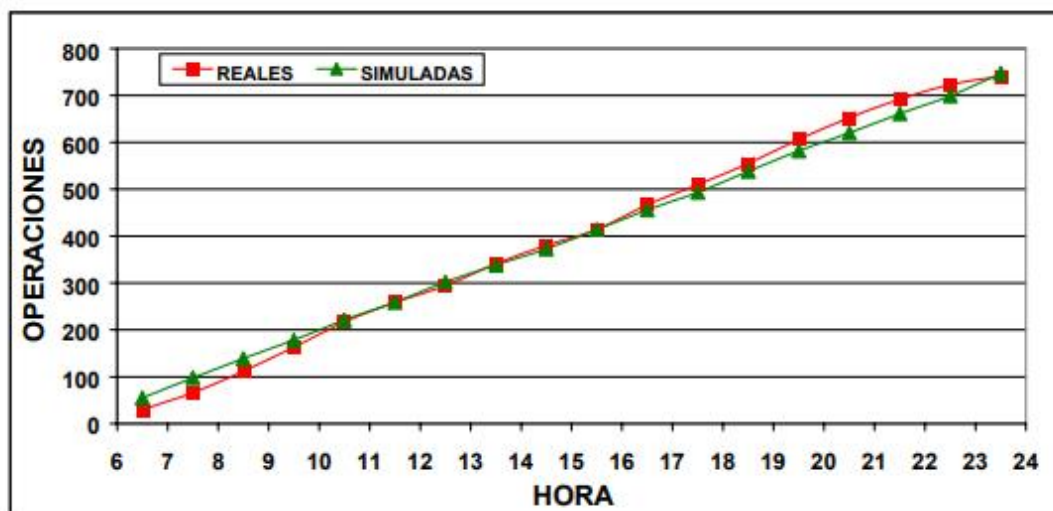


Para estimar el comportamiento general del modelo AICM2 se realizaron varias pruebas piloto. Mediante estas pruebas se obtuvieron los porcentajes promedio de aterrizajes y despegues, tanto para los vuelos nacionales como para los vuelos internacionales, del total de operaciones generadas por el

modelo de simulación²⁴. Al comparar los valores reales de estos porcentajes, contra los valores promedio generados por el modelo de simulación, se observó una diferencia mínima, el promedio de las diferencias entre estos valores fue menor al 1%.

Prosiguiendo con el proceso de validación y verificación del modelo AICM2, también se compararon las operaciones efectuadas (reales) en el aeropuerto de la Ciudad de México, contra las que se obtienen mediante el modelo de simulación AICM2, en la Figura 6.3. se muestran dicha comparación. En esta figura se representan las operaciones acumuladas durante cada hora de operación del aeropuerto, a partir de la 06:00 horas y hasta las 24:00 horas. Como se observa en esta figura, los resultados del modelo son consistentes con los datos reales y también son una representación del modelo conceptual establecido. Con base en los resultados anteriores se termina la validación y verificación del modelo de simulación AICM2.

Figura 6.3.
Operaciones acumuladas reales y simuladas mediante el modelo AICM2,
para el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, a partir de las 06:00
y hasta las 24:00 horas.



6.3. Efectos de la operación de sólo vuelos internacionales en el aeropuerto seleccionado.

Dado que es inminente la construcción de un nuevo aeropuerto metropolitano, es importante conocer cuál sería el comportamiento del aeropuerto de la Ciudad de México si se decidiera que continuara operando simultáneamente con el nuevo aeropuerto. Desde luego su operación estaría limitada a dar servicio a cierto tipo de vuelos, por ejemplo, sólo a los vuelos internacionales o a los nacionales. Mediante el modelo de simulación AICM2, se pueden estimar en forma cuantitativa estos efectos. En esta sección se realizan dos tipos de experimentos, en el primero se asume que los vuelos nacionales son trasladados al nuevo aeropuerto, por lo que el aeropuerto de la Ciudad de México sólo presta servicio a los vuelos internacionales. En el segundo experimento se evalúa la situación opuesta, es decir, aquella en la que el aeropuerto actual sólo da servicio a los vuelos nacionales. En ambos casos se estiman, mediante el modelo de simulación AICM2, los siguientes valores de interés: el tamaño promedio del número de aeronaves en la cola de espera; los tiempos promedio de espera de las aeronaves en la cola, considerando a todas las aeronaves, o considerando sólo aquellas aeronaves con tiempo de espera distinto de cero; el porcentaje de aeronaves del total, que no tienen que esperar en la cola para ser atendidas, es decir, el porcentaje de aeronaves que al llegar a las pistas son atendidas inmediatamente; la utilización promedio de las pistas; los tiempos promedio que las pistas permanecen inactivas entre periodos ocupados y, por último, los tiempos promedio que las pistas permanecen ocupadas entre periodos inactivos.

Se debe recordar que las estimaciones que proporciona el modelo de simulación AICM2, asumen la operación del aeropuerto de la Ciudad de México, desde las 06:00 horas y hasta las 24:00 horas (18 horas de tiempo simulado).

6.4. Efectos de la operación de sólo vuelos nacionales en el aeropuerto seleccionado.

Para reflejar el supuesto de que el aeropuerto de la Ciudad de México únicamente presta servicio a los vuelos internacionales, deben ser consideradas únicamente aquellas fuentes que generan transacciones de ese tipo (en este caso deben ser utilizadas las fuentes AITODOS*S y DITODOS*S). Es decir, no deben ser consideradas, bajo este supuesto, las fuentes que generan vuelos nacionales.

Por otra parte se asume que la capacidad de las pistas del aeropuerto es fija, con un valor igual a 55 operaciones por hora, por lo que el tiempo de servicio para cada aeronave es igual a 1.0909 minutos.

En este experimento se realizan inicialmente 30 corridas de simulación, con el modelo original AICM2 y posteriormente se efectúa igual número de corridas, con el modelo AICM2 modificado, como fue señalado antes. Un resumen de los resultados de estas pruebas se presenta en la Tabla 6.3.

Como se menciona en el Capítulo 3, los vuelos internacionales en el aeropuerto de la Ciudad de México representan aproximadamente el 23% de sus operaciones totales (véase Figura 3.7.). Así, bajo la consideración de que el aeropuerto de la Ciudad de México sólo presta servicio a los vuelos internacionales, se reduce notablemente el número de operaciones diarias que atiende, en el orden de un 77%, con respecto al total actual. Sin embargo, al comparar los resultados de la condición en la que el aeropuerto da servicio a todos los tipos de vuelos (segunda columna de la Tabla 6.3.) contra la condición en la cual el aeropuerto sólo atiende a los vuelos internacionales (tercera columna de la Tabla 6.3.), se observa que hay una reducción en mayor proporción en cuanto al tamaño de las colas de espera, dado que el modelo estima una reducción del orden del 99.1% (su tamaño se reduce de 2.32 a 0.02 aeronaves).

Tabla 6.3.
Resumen de los resultados del modelo de simulación AICM2 para la condición de la operación, del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, con todos los tipos de vuelos (nacionales e internacionales) y para su operación con sólo los vuelos internacionales.

PARÁMETRO	OPERACIÓN CON VUELOS NACIONALES E INTERNACIONALES	OPERACIÓN CON SÓLO VUELOS INTERNACIONALES
TAMAÑO PROMEDIO DEL NÚMERO DE AERONAVES EN LA COLA DE ESPERA	2.32	0.02
TIEMPO PROMEDIO DE ESPERA DE TODAS LAS AERONAVES (minutos)	3.03	0.13
TIEMPO PROMEDIO DE ESPERA DE LAS AERONAVES QUE HACEN COLA (minutos)	3.64	0.70
PORCENTAJE PROMEDIO DE AERONAVES CON TIEMPO DE ESPERA IGUAL A CERO (%)	20	79
UTILIZACIÓN PROMEDIO DE LAS PISTAS	0.8205	0.1750
TIEMPO PROMEDIO QUE LAS PISTAS PERMANECEN INACTIVAS ENTRE PERIODOS OCUPADOS (minutos)	1.38	6.33
TIEMPO PROMEDIO QUE LAS PISTAS PERMANECEN OCUPADAS ENTRE PERIODOS INACTIVOS (minutos)	6.68	1.35

También hay un notable decremento en los tiempos promedio de espera de todas las aeronaves del 95.7% (baja de 3.03 a 0.13 minutos) y, en el caso de las aeronaves con tiempo de espera distinto de cero, el decremento es de 80.7% (baja de 3.64 a 0.7 minutos). De acuerdo con las estimaciones del modelo de simulación, se debe esperar un incremento importante en el porcentaje promedio de aeronaves que no tiene que hacer cola para aterrizar o despegar, es decir, para aquellas aeronaves cuyo tiempo de espera es igual a cero, dado que se estima un incremento del 59% en este valor (sube de 20 a 79%). Dado que el aeropuerto atiende a un menor número de aeronaves, sus pistas tienen una menor utilización, por ello su utilización promedio disminuye un 78.6% (baja de 0.8205 a 0.1750). Lo anterior se refleja también en los tiempos promedio que las pistas permanecen inactivas entre periodos ocupados, dado que este valor se incrementa en un 358.6% (sube de 1.38 a 6.33 minutos), por el contrario, el tiempo promedio que las pistas permanecen ocupadas entre periodos inactivos disminuye un 79.7% (baja de 6.68 a 1.35 minutos).

7. Conclusiones y recomendaciones.

En este trabajo se estableció un modelo de simulación para las operaciones aéreas, aunque sólo para el intervalo de mayor actividad (entre las 06:00 y 24:00 horas). Aún con todo, el modelo obtenido sirve para realizar análisis sin grandes complicaciones matemáticas o requerimientos especiales de cómputo o de paquetes de simulación costosos. También debe observarse que no se requieren largos tiempos para la ejecución de las simulaciones. Mediante el modelo de simulación establecido, es posible estimar en forma cuantitativa los efectos o impactos esperados de cambios en la operación del aeropuerto. De esta manera, el modelo de simulación es una herramienta para evaluar el rendimiento de la actividad aérea del aeropuerto, e incluso para evaluar mejoras potenciales en su operación.

Mediante el procedimiento seguido aquí, es posible elaborar modelos de simulación para otros aeropuertos. Sin embargo, puede ser de interés el desarrollo de modelos de simulación que incluyan las 24 horas de operación diaria de un aeropuerto, es decir, que incluyan también los periodos de muy baja actividad, con el objeto de hacer evaluaciones globales con un sólo modelo. También puede ser de interés el desarrollo de modelos que incluyan otras etapas de la operación de un aeropuerto, como es el movimiento de las aeronaves en su trayectoria de carreteo desde y hacia sus posiciones de embarque y desembarque. Las ideas establecidas en el presente trabajo, representan un paso hacia el desarrollo de tales modelos.

De acuerdo con los resultados de este trabajo, la actividad aérea del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, tiene poco margen para incrementar sus operaciones aéreas dentro del intervalo de las 06:00 a las 24:00 horas. Aunque todavía se puede aumentar el número de operaciones diarias, el modelo de simulación estima que pronto se tendrá un deterioro significativo en el nivel de servicio del aeropuerto, lo cual incrementará los riesgos en su operación. Por otro lado, los resultados de las simulaciones indican que un pequeño aumento en la capacidad de las pistas del aeropuerto, se traduce en una disminución importante en el tamaño promedio de las colas de espera y también en notables reducciones en los tiempos

promedio de espera de las aeronaves. Por el contrario, pequeñas reducciones en la capacidad de sus pistas, producen enormes impactos negativos en su operación, esta situación se puede producir, por ejemplo, cuando deja de operar alguna de sus pistas debido a labores de mantenimiento. El modelo de simulación también establece que, la operación en el aeropuerto de aeronaves con mayor capacidad de pasajeros, puede ayudar a mejorar la calidad del servicio en las pistas, al reducirse principalmente los tamaños de las colas y los tiempos de espera.

Es importante señalar que se observa una subutilización significativa de las pistas del aeropuerto durante las primeras horas del día. Por ello, es recomendable tratar de incentivar el traslado de algunas de las operaciones realizadas durante el periodo de mayor actividad a las primeras seis horas del día y también canalizar la nueva demanda de servicio a este horario. Por ejemplo, si no es posible evitar las operaciones de la aviación general en este aeropuerto (4% de las operaciones totales), se puede restringir su operación al intervalo de las 00:00 hasta las 06:00 horas. También se puede incentivar la utilización de este lapso mediante la disminución de pagos de derechos o de servicios a la aviación de carga o incluso a la aviación de pasajeros en dicho horario, aunque debe considerarse que los usuarios normalmente no solicitan servicios en este horario (por la incomodidad que ello implica); sin embargo, una disminución en el pago de derechos o servicios podría reflejarse en el costo total del transporte, lo cual podría ser atractivo para algunos usuarios. No debe perderse de vista el hecho de que, si bien la medida anterior reduce los ingresos al aeropuerto por operación (únicamente en el periodo de muy baja actividad) puede permitir, a la vez, postergar las grandes inversiones requeridas para la construcción de un nuevo aeropuerto.

De acuerdo con los resultados de una variante del modelo de simulación original, se estima que en el caso de que se trasladaran, ya sea los vuelos nacionales o los internacionales del aeropuerto de la Ciudad de México hacia otro aeropuerto, el nivel de servicio para sus usuarios mejoraría significativamente; sin embargo, lo anterior implicaría una reducción importante en la utilización de sus pistas, sobre todo en el caso de que sólo diera servicio a los vuelos internacionales.