



Certificación ISO 9001:2008 ‡

ESTRATEGIA PARA REDUCIR LAS EMISIONES DE GASES CONTAMINANTES EN AEROPUERTOS SATURADOS. EL CASO DEL AEROPUERTO INTERNACIONAL DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

**Alfonso Herrera García
Santiago Servín Caballero**

**Publicación Técnica No. 366
Sanfandila, Qro, 2012**

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

Estrategia para reducir las emisiones de gases contaminantes en aeropuertos saturados. El caso del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México.

**Publicación Técnica No. 366
Sanfandila, Qro, 2012**

Este trabajo fue realizado en el Instituto Mexicano del Transporte, por el investigador titular de la Coordinación de Integración del Transporte (CIT), M. en I. Alfonso Herrera García, y por el tesista de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Chihuahua, M. en I. Santiago Servín Caballero.

Los autores agradecen los comentarios, sugerencias y apoyo del Coordinador de la CIT, Dr. Carlos Daniel Martner Peyrelongue.

Índice

Índice	V
Resumen	VII
Abstract	IX
Resumen ejecutivo	XI
1 Introducción	1
1.1 Justificación	1
1.2 Hipótesis	3
1.3 Objetivos	4
1.4 Metodología	4
1.5 Importancia del AICM	5
1.5.1 Marco histórico	5
1.5.2 Datos y características generales del AICM	7
1.6 Aspectos generales sobre el control de tránsito aéreo en el AICM	13
2 Desarrollo del modelo de simulación	19
2.1 Planeación para la elaboración del modelo de simulación y su experimentación	19
2.1.1 Formulación del problema	22
2.1.2 Modelo conceptual	22
2.1.3 Recolección y procesamiento de datos operativos	26
2.1.3.1 Distribuciones de probabilidad y pruebas de bondad de ajuste de las tasas de llegada y salida de aeronaves	31
2.1.4 Construcción del modelo en un programa de computadora	35
2.1.4.1 Selección del programa de computadora	35
2.1.4.2 Descripción de la construcción del modelo de simulación	36
2.1.5 Realización de pruebas piloto	45
2.1.6 Verificación y validación del modelo	46
2.1.6.1 Verificación del modelo	46
2.1.6.2 Validación del modelo	47
2.1.6.3 Estimación del número de réplicas requeridas	48
2.1.6.4 Resultados de la validación del modelo	48
3 Diseño de los experimentos para la estimación de las emisiones bajo distintos escenarios	57
3.1 Consideraciones generales	57
3.2 Estimación de emisiones de CO ₂ en el AICM, bajo las condiciones operacionales de enero de 2011	57
3.3 Aplicación de una estrategia en el AICM, para la reducción de las emisiones de CO ₂ generadas por las aeronaves, bajo las condiciones de operación de enero de 2011	61
3.4 Estimación de las emisiones de CO ₂ para tres escenarios futuros y su reducción al aplicar una nueva política operacional en el AICM	64
4 Resultados y análisis	69
4.1 Consideraciones generales	69
4.2 Resultados de la estimación de emisiones de CO ₂ en el AICM, bajo las	

condiciones operacionales de enero de 2011	69
4.3 Resultados de la aplicación de la estrategia en el AICM para reducir las emisiones de CO ₂	71
4.4 Resultados de la estimación de emisiones de CO ₂ para tres escenarios futuros y su reducción al aplicar la estrategia propuesta	74
5 Conclusiones y recomendaciones	79
6 Bibliografía	81
Anexos	85

Resumen

En este trabajo se evaluaron los beneficios de aplicar una estrategia que cambia el orden de atención de las aeronaves, en las pistas del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, por otra que disminuye las emisiones de CO₂ de las aeronaves, durante las fases de despegue y aterrizaje. Este nuevo orden de atención se fundamenta en la aplicación de un algoritmo heurístico, que evalúa las diferentes alternativas y determina cuál es la que genera la menor cantidad de CO₂. Para obtener la evaluación de los beneficios señalados se desarrolló un modelo de simulación de las operaciones aéreas.

Los resultados, presentados mediante tablas y figuras, indican que al aplicar la nueva estrategia se pueden reducir significativamente las emisiones de CO₂. Por ejemplo, con la demanda de servicio de enero de 2011, se obtuvo una reducción de 390 toneladas de CO₂ diarias. También, se observó que conforme se acerca la demanda de servicio a la capacidad máxima de las pistas, se incrementan tanto las emisiones de CO₂, como los beneficios potenciales de la nueva estrategia. Así, para una demanda de servicio igual al 100% de la capacidad máxima de las pistas, se obtuvo una reducción diaria de 762 toneladas de CO₂.

Palabras clave: aeronave, aeropuerto, algoritmo heurístico, CO₂, modelo de simulación.

Estrategia para reducir las emisiones de gases contaminantes en aeropuertos saturados. El caso del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México.

Abstract

In this research, the benefits of applying a new strategy that changes the aircraft attention order in the runways of the Mexico City International Airport were evaluated. The new strategy reduces the CO₂ emissions of the aircraft during the landing and takeoff phases. The new attention order was obtained using a heuristic algorithm that evaluates all the alternatives and determines which of them produces the lowest amount of CO₂. In order to obtain the evaluation of the benefits, it was developed a simulation model of the aircraft movements.

According to the results, showed using tables and figures, it was estimated that the new strategy could reduce significantly the CO₂ emissions. For instance, a daily reduction of 390 tons of CO₂ was obtained considering the demand of January 2011. Also, it was observed that as the demand increases to the runway maximum capacity, the CO₂ emissions and the potential benefits of the new strategy were increased. Thus, considering a demand equal to the 100% of the maximum runway capacity, a daily reduction of 762 tons of CO₂ was estimated.

Keywords: aircraft, airport, CO₂, heuristic algorithm, simulation model.

Estrategia para reducir las emisiones de gases contaminantes en aeropuertos saturados. El caso del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México.

Resumen ejecutivo

Introducción

El principal reto del sistema aeroportuario nacional continúa siendo la enorme demanda de servicios a atender en el centro del país, particularmente en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM). Por ello, se requiere atender la insuficiencia de servicios aeroportuarios en el Valle de México instrumentando una solución a largo plazo, lo cual se traducirá en la construcción de un nuevo aeropuerto.

Por otro lado, el proceso de cambio climático se perfila como el problema ambiental global más relevante de nuestro siglo. Por el alcance de sus implicaciones económicas, políticas y sociales, es hoy tema ineludible de la agenda internacional y objeto de preocupación para las instancias de más alto nivel de los gobiernos.

En el Plan Nacional de Desarrollo (PND) 2007-2012 se estimó que en 2002 México generó el equivalente a 643,183 millones de toneladas de CO₂, volumen que lo sitúa dentro de los 15 principales países emisores, con una contribución de alrededor de 1.5% de las emisiones globales. En lo que respecta a las fuentes responsables de emisiones, corresponde 18% al transporte.

Como signatario del Protocolo de Kyoto, México tiene el compromiso de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Por ello, en el PND se estableció dentro de las acciones relacionadas con el transporte, fomentar la investigación en tecnologías de menor intensidad energética; promover el uso eficiente de energía en el ámbito doméstico, industrial, agrícola y de transporte; y generar información científica y técnica que permita el avance del conocimiento sobre los aspectos ambientales prioritarios para apoyar la toma de decisiones del estado mexicano y facilitar una participación pública responsable y enterada.

Por ello, resulta de interés estimar las emisiones contaminantes en el aire, generadas por la operación aérea en México, y en particular en la principal infraestructura aérea del país. Con objeto de cuantificar objetivamente la dimensión de las afectaciones ambientales en el aire, y proponer mecanismos que podrían utilizarse para reducir las emisiones de gases contaminantes.

La hipótesis de trabajo establece que se podrían obtener ahorros significativos en la reducción de emisiones de gases contaminantes en el AICM, al aplicar una nueva estrategia de atención de las aeronaves; y que se generarán volúmenes de gases contaminantes con una proporción exponencial conforme aumenta la demanda del aeropuerto.

El objetivo de este trabajo fue aplicar y cuantificar los beneficios de una nueva estrategia de atención de las aeronaves en el AICM, con objeto de reducir las emisiones de gases contaminantes que genera su operación. Con este fin, se

desarrolló un modelo de simulación de las operaciones de aterrizaje y despegue en el AICM.

Para realizar este trabajo se siguieron estos pasos:

- a) Desarrollo y validación del modelo de simulación.
- b) Estimación de las emisiones de gases contaminantes bajo las condiciones operacionales de enero de 2011.
- c) Estimación de las emisiones de gases contaminantes al aplicar la nueva estrategia propuesta.
- d) Determinación de los beneficios potenciales de 2011 y para tres escenarios futuros, en términos de reducción de emisiones de gases contaminantes.

Desarrollo y validación del modelo de simulación

Hay una secuencia de pasos que deben seguirse para la elaboración de un modelo de simulación y para la realización de experimentos con él. Los pasos fueron los siguientes.

1. Formulación del problema
2. Conceptualización del modelo
3. Recolección y procesamiento de datos tomados de la realidad
4. Construcción del modelo en un lenguaje de computadora
5. Realización de pruebas piloto
6. Validación y verificación del modelo
7. Diseño de los experimentos de simulación
8. Simulaciones con el modelo
9. Análisis de los resultados de las simulaciones
10. Simulaciones adicionales
11. Reporte del trabajo

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 indican las preguntas que deben responderse mediante la simulación. Debido a que el AICM es la principal infraestructura aérea del país, también es la que genera los mayores volúmenes de gases contaminantes, derivados de la operación misma. Por lo anterior, sería deseable aplicar una estrategia de atención de aeronaves que disminuya las emisiones contaminantes. Para ello, la estrategia propuesta cambia el orden de atención tradicional de las aeronaves, por otro que minimiza dichos valores. Para evaluar la estrategia se desarrolló un modelo de simulación de eventos discretos del AICM, en donde se aplica la estrategia propuesta y se compara con la situación actual. De esta forma se determinan los beneficios potenciales, en términos de reducción de emisiones de gases contaminantes.

El modelo conceptual define qué aspectos del sistema son representados en el modelo y cuáles no, además, establece con qué nivel de detalle se hace dicha representación. Se puede considerar 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 que solicitaron su servicio, así la primer aeronave que haya solicitado realizar alguna operación de aterrizaje o despegue será la primera en ser atendida. Por otro lado, ya que la separación de las pistas del AICM, no permite operaciones simultáneas, sino solamente secuenciales, se puede considerar una primera restricción al modelo, la cual señala que ambas pistas no tienen autorización de dar servicio al mismo tiempo. Esta condición establece la capacidad actual del conjunto de las dos pistas del AICM de 61 operaciones/hora.

Hay una constante interacción entre la construcción del modelo y la recolección de los datos necesarios para su funcionamiento. Los objetivos del estudio establecen, en gran medida, la clase de datos requeridos. La información utilizada fue obtenida del organismo federal, Servicios a la Navegación en el Espacio Aéreo Mexicano (SENEAM) y de la empresa Grupo Aeroportuario de la Ciudad de México (GACM).

Durante la construcción del modelo en un programa de computadora, el modelo conceptual fue codificado en un formato de programación. La formulación de la codificación requirió definir dos aspectos importantes: el programa de cómputo a utilizar y las condiciones iniciales. En cuanto a los programas de computación que se pueden utilizar para la codificación, existen en términos generales dos posibilidades, la primera es que se escriba el programa en un lenguaje general de programación como FORTRAN, VISUAL BASIC o C++, la otra posibilidad es que se utilice un programa especial para fines de simulación. En este trabajo se optó por utilizar un programa especializado, en particular el programa FLEXSIM, versión 5.0.

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, 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 simulación.

Se dice que un modelo es válido si representa adecuadamente al sistema que está siendo modelado. En el caso que nos ocupa, el modelo se diseñó para un sistema ya existente, por lo cual, la validación del modelo puede ser evaluada al comparar los resultados de las simulaciones del modelo contra los datos del sistema real. Si los comportamientos, entre el modelo y el sistema real son consistentes, el modelo es válido. Por otro lado, el propósito de la verificación del modelo es asegurar que el modelo conceptual esté reflejado con precisión en su representación computarizada. Se dice que verificar es construir correctamente el modelo, mientras que validar es construir el modelo correcto.

Diseño de los experimentos para la estimación de las emisiones bajo distintos escenarios

Se realizaron tres experimentos, en el primero se estimaron las emisiones de CO₂ generadas en el AICM, bajo las condiciones operativas de enero de 2011, durante las fases de aterrizaje y despegue de las aeronaves, y también durante su rodaje. En el segundo experimento, con base en las emisiones unitarias de CO₂ por tipo de aeronave, los tiempos de operación y las demoras de las aeronaves en las colas, se aplicó una estrategia que permite reducir las emisiones de gases contaminantes. Por último, en el tercer experimento se estimó y evaluó el efecto del crecimiento de la demanda en las pistas del AICM, considerando tres escenarios futuros de su capacidad máxima: 80%, 90% y 100%. En cada uno de estos escenarios fueron estimadas las emisiones de CO₂, bajo la condición de operación actual y aplicando la estrategia propuesta, con objeto de estimar la reducción de emisiones en cada uno de los escenarios planteados.

Resultados y análisis

Los resultados de la estimación de emisiones de CO₂ de las aeronaves que operaron en el AICM, en enero de 2011, indican que bajo la política actual de atención de aeronaves, se generaron 2,762 toneladas diarias de CO₂ y que cuando se aplicó la estrategia propuesta, éstas se redujeron a 2,372 toneladas diarias, por lo que las emisiones se podrían reducir hasta en un 14%, lo que se traduce en una reducción del orden de 390 toneladas de CO₂ diarias.

Por otra parte, los resultados de la estimación de emisiones de CO₂ para los tres escenarios futuros y su reducción al aplicar la estrategia propuesta, señalan que al

incrementarse la demanda de servicio, se incrementan las emisiones de CO₂, pero también los beneficios potenciales de la nueva estrategia. Así, para las demandas de 80%, 90% y 100% de la capacidad máxima de las pistas, se obtienen bajo la política actual, emisiones del orden de 3,181, 3,606 y 4,095 toneladas diarias de CO₂, y al aplicar la nueva estrategia se obtienen reducciones en estas emisiones del orden de 16%, 17% y 19% respectivamente.

También se determinó, con base en las estimaciones anteriores, que existe una correlación exponencial significativa entre las emisiones de CO₂ generadas por la operación de las aeronaves y el crecimiento de la demanda en las pistas del AICM.

Conclusiones y recomendaciones

Se observó que al aplicar la estrategia propuesta se pueden obtener ahorros significativos en la reducción de emisiones de gases contaminantes en el AICM; y además, que se generan volúmenes de gases contaminantes con una proporción exponencial, conforme aumenta la demanda de servicio. Por lo tanto, resultó verdadera la hipótesis de trabajo.

Se detectó que durante su operación las aeronaves consumen un tiempo significativo en las líneas de espera, en promedio esto representó el 37% del tiempo total utilizado en cada operación realizada. Por lo tanto, se debe buscar reducir las colas, dado que éstas son un factor importante en la generación de gases contaminantes.

Debido a que se observó una subutilización significativa de las pistas del aeropuerto durante las primeras horas del día, es recomendable incentivar el traslado de algunas de las operaciones realizadas durante el periodo de mayor actividad a ese intervalo, y también canalizar la nueva demanda de servicio a ese periodo. Esto podría reducir el número y tamaño de las colas de aeronaves, con lo cual también se reducirían las emisiones de gases contaminantes.

La actividad aérea en el AICM, generó en enero de 2011, un promedio de 2,762 toneladas diarias de CO₂. Al aplicar la estrategia propuesta, se estimó que se pueden disminuir hasta en un 14% estas emisiones, lo que se traduce en una reducción del orden de 390 toneladas de CO₂ diarias.

También, se observó que conforme se acerca la demanda de servicio a la capacidad máxima de las pistas, se incrementan las emisiones de CO₂, pero también los beneficios potenciales al aplicar la nueva estrategia. Así, para una demanda de servicio igual al 100% de la capacidad máxima de las pistas, se puede obtener hasta 18.6% en la reducción de emisiones, lo cual corresponde a 762 toneladas de CO₂ por día.

1 Introducción

1.1 Justificación

En el ámbito mundial se ha incrementado rápidamente la demanda por el uso de los aeropuertos, mientras que la capacidad de los mismos se ha estancado. Como resultado se ha presentado una aguda saturación en muchos de los principales aeropuertos del mundo. Este problema no sólo es significativo, sino que se espera que empeore. La Federal Aviation Administration (FAA) de los Estados Unidos, predice incrementos importantes del tránsito aéreo en los próximos años, mientras que no se espera un aumento apreciable en la capacidad de los aeropuertos. En el caso de México la situación no es muy diferente. La falta de suficiente capacidad aeroportuaria para cumplir con la demanda originada por el movimiento de pasajeros y carga, genera saturación en los aeropuertos y demoras en las operaciones. En el Programa Sectorial de Comunicaciones y Transportes 2007-2012, sólo se establece la construcción de tres nuevos aeropuertos (Objetivo 4.2.1¹).

El principal reto del sistema aeroportuario nacional continúa siendo la enorme demanda de servicios a atender en el centro del país, particularmente en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM), lo que ha tenido como respuesta la ampliación y remodelación de la Terminal 1 (T1), a su máxima capacidad y la construcción de la nueva Terminal 2 de pasajeros (T2). Sin embargo, debido a la falta de espacio no fue posible aumentar la capacidad de sus pistas, por lo que éstas constituyen el elemento crítico que limita su capacidad total. Las pistas del AICM tienen una separación de 310 metros, lo cual no permite la realización de operaciones simultáneas, sólo secuenciales. Esta condición limita su capacidad a 61 operaciones/hora.

Por ello, se requiere atender la insuficiencia de servicios aeroportuarios en el Valle de México instrumentando una solución a largo plazo (SCT, 2008, p. 109), lo cual se traducirá en la construcción de un nuevo aeropuerto; sin embargo, debido a que todavía no se ha definido incluso la ubicación de dicha infraestructura, el actual aeropuerto deberá operar aun durante varios años. Se ha estimado que dicho proyecto requerirá de cuando menos cinco años para su desarrollo (Herrera, 2001).

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

¹ En la Riviera Maya, en Quintana Roo; en Mar de Cortés (Puerto Peñasco) en Sonora; y en Ensenada (Mesa del Tigre) en Baja California (SCT, 2008).

más, operando muy cerca de su capacidad máxima, sin embargo, esta condición genera diversas dificultades y grandes retos.

Por otro lado, el proceso de cambio climático se perfila como el problema ambiental global más relevante de nuestro siglo, en función de sus impactos previsibles. Por el alcance de sus implicaciones económicas, políticas y sociales, es hoy tema ineludible de la agenda internacional y objeto de preocupación para las instancias de más alto nivel de los gobiernos (PEF, 2009, p. i).

El Gobierno de México reconoce que el cambio climático constituye el principal desafío ambiental global de este siglo y que representa, a mediano y largo plazo, una de las mayores amenazas para el proceso de desarrollo y el bienestar humano. Enfrentar el cambio climático implica desarrollar de inmediato actividades de mitigación, o reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y de adaptación, o reducción de la vulnerabilidad y de los riesgos para la vida, para el orden natural y el desarrollo.

Recientemente varios grupos de expertos en aspectos científicos, económicos y sociales del cambio climático, consideran que los riesgos son considerablemente más graves de lo que se había estimado anteriormente, de tal manera que las estrategias de mitigación contempladas en la actualidad posiblemente tengan que revisarse muy pronto (PEF, 2009, p. vii). Por ejemplo, hasta hace unos años la utilización de las aeronaves no había causado preocupación como una fuente de emisiones de GEI, debido a las rápidas mejoras que se habían obtenido en la eficiencia de los motores de las aeronaves. Sin embargo, estudios a principios de los noventa mostraron que las emisiones de NOx de las aeronaves son un precursor significativo de GEI, dado que producen cerca de 35 veces el efecto de las emisiones generadas al nivel del suelo (Michaelis, 1996).

En el Plan Nacional de Desarrollo (PND) 2007-2012 se estimó que en 2002 México generó el equivalente a 643,183 millones de toneladas de CO₂, volumen que lo sitúa dentro de los 15 principales países emisores, con una contribución de alrededor de 1.5% de las emisiones globales. En lo que respecta a las fuentes responsables de emisiones, corresponde 18% al transporte (Gobierno de los Estados Unidos Mexicanos, 2007, p. 259).

Como signatario del Protocolo de Kyoto, México tiene el compromiso de reducir las emisiones de GEI (SCT, 2008, p. 25). Por ello, el PND (p. 260) establece, dentro de las acciones relacionadas con el transporte, en la Estrategia 10.1: *“...fomentar la investigación en tecnologías de menor intensidad energética”*, y en la Estrategia 10.2 *“Promover el uso eficiente de energía en el ámbito doméstico, industrial, agrícola y de transporte”*. Además, señala en el objetivo 13 de sustentabilidad ambiental (p. 266): *“Generar información científica y técnica que permita el avance del conocimiento sobre los aspectos ambientales prioritarios para apoyar la toma de decisiones del estado mexicano y facilitar una participación pública responsable y enterada”*.

Por ello, resulta de interés estimar las emisiones contaminantes en el aire, generadas por la operación aérea en México y, en particular, en la principal infraestructura aérea del país, con objeto de cuantificar objetivamente la dimensión de las afectaciones ambientales en el aire y proponer mecanismos que podrían utilizarse para reducir las emisiones de gases contaminantes.

Las actividades de investigación y desarrollo en materia de cambio climático permiten optimizar la aplicación de los recursos disponibles para enfrentar dicho proceso y enfocar esfuerzos en diversos ámbitos. De esta forma se busca fortalecer las capacidades locales y nacionales y contar con acervos documentales para enfrentar el cambio climático. Algunos de los objetivos prioritarios de investigación y desarrollo para la mitigación, la adaptación y la vulnerabilidad en México, en el tema de investigación básica son: Estimar factores nacionales de emisión para las principales fuentes emisoras de GEI (Objetivo 4.5.4), y evaluar el potencial de opciones tecnológicas de mitigación para los sectores emisores clave (Objetivo 4.5.10) (PEF, 2009, pp. 87 y 88).

Con anterioridad fue desarrollada una estrategia que disminuye los costos de operación y las demoras de aeronaves en aeropuertos saturados, al cambiar el orden de atención tradicional, por otro que minimiza dichos valores (Herrera, 2011; y Herrera y Moreno, 2011). Dado que dicha estrategia, generalmente disminuye también las demoras de las aeronaves más grandes, que son las que utilizan los motores más potentes y con mayor consumo energético, se espera que su aplicación también disminuya las emisiones de los gases contaminantes que generan. Por ello, se desarrolló un modelo de simulación de eventos discretos del AICM, en donde se aplicó la estrategia propuesta para compararla con la situación actual y determinar los beneficios potenciales, en términos de reducción de emisiones de gases contaminantes.

El desarrollo y empleo de modelos computacionales para evaluar los niveles prevalecientes de servicio, las posibles opciones para reducir la congestión y como herramienta para mejorar la eficiencia de la operación y administración aeroportuaria, ha sido ampliamente reconocida y documentada. (Herrera, 2006, pp. 48 y 49).

1.2 Hipótesis

Se generarán ahorros significativos en la reducción de emisiones de gases contaminantes en el AICM, al aplicar una nueva estrategia de atención de las aeronaves. Además, se generarán volúmenes de gases contaminantes con una proporción exponencial conforme aumenta la demanda del aeropuerto.

1.3 Objetivos

Objetivo general: Aplicar y cuantificar los beneficios de una estrategia que establece el orden de atención de las aeronaves en el AICM, con objeto de reducir las emisiones de gases contaminantes que genera su operación.

Objetivos específicos:

- a) Cuantificar los volúmenes de gases contaminantes de las aeronaves que operan en el AICM, bajo las condiciones de 2011.
- b) Cuantificar el beneficio potencial en 2011, en términos de reducción de emisiones de gases contaminantes, al aplicar la estrategia propuesta.
- c) Determinar las emisiones de gases contaminantes para tres escenarios que consideren el crecimiento de la demanda del AICM, bajo la política actual y al aplicar la estrategia propuesta.
- d) Estimar los niveles de partículas contaminantes emitidas por los motores de las principales aeronaves que operan en el AICM.

1.4 Metodología

La secuencia de pasos a seguir son:

- a) Desarrollar y validar el modelo de simulación (Herrera, 2001).
- b) Estimar las emisiones de gases contaminantes en el AICM bajo las condiciones operacionales de enero de 2011. Se utilizará el modelo desarrollado e información de las emisiones de gases contaminantes emitidos por los motores de las principales aeronaves que operan en el AICM.
- c) Estimar las emisiones de gases contaminantes al aplicar la estrategia propuesta al AICM (Herrera, 2011; y Herrera y Moreno, 2011).
- d) Determinar los beneficios potenciales en 2011 y para tres escenarios futuros, en términos de reducción de emisiones de gases contaminantes. Estos se obtendrán al restar a los valores obtenidos con la política actual de atención de aeronaves, los valores que resulten de aplicar la estrategia propuesta.
- e) Elaborar el reporte final.

1.5 Importancia del AICM

1.5.1 Marco histórico

Con el desarrollo y operación de los primeros aviones se hicieron necesarios los primeros campos de aviación y desde entonces marchan paralelamente los avances aeronáuticos y aeroportuarios.

El primer campo de aviación de México se estableció en los llanos de Balbuena, donde volaron Braniff, Lebrija, Villasana, Medía y otros, en 1910. A ellos, siguieron los militares como Salinas Carranza, quien se estableció también en Balbuena con el material aeronáutico y humano con que había formado la Flotilla Aérea del Ejército Constitucionalista. Posteriormente, a partir de 1915, Balbuena sería el lugar en que nacieron y progresaron la Escuela Militar de Aviación y los Talleres Nacionales de Construcciones Aeronáuticas, fundamentos de la Fuerza Aérea Mexicana.

Terminada la Primera Guerra Mundial y aprovechando los avances que se habían logrado en aviones y motores, comenzaron a surgir por todo el mundo los primeros servicios aéreos civiles.

La Secretaría de Comunicaciones y Obras Públicas (SCOP)² otorgó, el 12 de julio de 1921, la primera concesión para el transporte aéreo de pasajeros, correo y servicio rápido a la Compañía Mexicana de Transportación Aérea.

El 5 de noviembre de 1928 se inició en un pequeño espacio del actual campo aéreo, la construcción de la nueva terminal para la aviación civil y para febrero de 1929 ya estaba en servicio. La compañía Mexicana de Aviación contribuyó a su construcción con una aportación de 400,000 pesos oro. El servicio regular inició el 1 de marzo de 1929. El 11 de febrero de 1931 se puso en servicio un sistema de iluminación, que incluía un faro, luces de linderos e iluminación de pistas y plataformas para operaciones nocturnas y fue inaugurado oficialmente el 15 de mayo de 1931. Su primera ruta internacional fue al Aeropuerto Internacional de Los Ángeles por parte de Mexicana de Aviación.

En 1939, se inauguró el Puerto Aéreo Central de la Ciudad de México, construido por la SCOP con la participación de Mexicana. Éste fue destinado a la aviación civil.

El 8 de julio de 1943 se publicó en el Diario Oficial de la Federación el decreto que declaraba internacional al Puerto Aéreo Central de la Ciudad de México, para

² Secretaría de Estado, ahora Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), cuya función principal era formular, conducir y regular las políticas y programas para el desarrollo del transporte y las comunicaciones de acuerdo con las necesidades del país. Permaneció con este nombre de 1920 a 1959.

efectos de entrada y salida de pasajeros y aviones. Seis años después inició la construcción de la pista 05D-23I y nuevas instalaciones como plataforma, edificio terminal, torre de control y oficinas para autoridades. La pista entró en servicio en 1951 y el 19 de noviembre de 1952 se inauguró el inmueble.

La terminal se construyó entre 1946 y 1952, durante el Gobierno de Miguel Alemán Valdés, junto con muchos aeropuertos de México. Fue adaptado a la era del motor de reacción (*jet*) por la Oficina de Aeropuertos de la SCOP bajo la dirección del ingeniero Dagoberto Flores Calderón, reinaugurándose el 19 de noviembre de 1952, desapareciendo en el proceso el Aeropuerto Militar de Balbuena.

El 2 de diciembre de 1963, por acuerdo del entonces Secretario de Comunicaciones y Transportes, Walter C. Buchanan, el Aeropuerto Central cambió su nombre por el de Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM). Años más tarde, el 24 de noviembre de 2006, se publicó un decreto en el Diario Oficial de la Federación, mediante el cual se le daba el nombre de Benito Juárez.

El desarrollo de las aeronaves, de la navegación aérea y de los servicios auxiliares y complementarios, había superado a la infraestructura. Esta situación hizo crisis en 1964 cuando fue necesario cerrar varios aeropuertos por peligrosos, entre ellos el de Guadalajara, que era el segundo en importancia en la República Mexicana. Ante esta situación tan grave, el Gobierno Federal tomó una serie de decisiones para solucionar el problema de fondo y crear los medios necesarios para garantizar la enorme inversión requerida.

Por instrucciones del Presidente de la República Gustavo Díaz Ordaz se pusieron en marcha varios programas. Mediante uno de ellos se constituyó el organismo público descentralizado denominado Aeropuertos y Servicios Auxiliares³ (ASA), el 12 de junio de 1965. El 24 de noviembre de 1978, se inauguró la Torre de Control "México", que a la fecha sigue en operación.

El AICM ha sido objeto de permanentes cambios en su infraestructura, el 15 de agosto de 1979, se inauguró la remodelación del edificio terminal, obra que se llevó a cabo en poco más de un año. Mediante ésta se logró una mejor distribución del espacio para el movimiento de pasajeros en pasillos y ambulatorio. Esta primera fase expansionista incluyó la ampliación del edificio terminal a más del doble. Se optó por un concepto de terminal única, en vez de múltiples terminales, como en otros aeropuertos, con el fin de completar una obra gigantesca, pero cómoda y accesible a la vez.

³ Organismo cuya función original era operar, administrar y dar mantenimiento a todos los aeropuertos de la república, que formaban parte del patrimonio del gobierno, ya que todos los que no eran federales habían sido adquiridos previamente por éste.

En junio de 1990, se inauguraron las nuevas zonas de documentación del área internacional del aeropuerto, completando la absoluta división de operaciones nacionales e internacionales, por lo que incluso las puertas de abordaje fueron separadas, con el fin de aumentar la funcionalidad de la terminal.

Debido al constante crecimiento de la demanda, tanto en número de pasajeros como de operaciones, el 13 de enero de 1994, se publicó en el Diario Oficial de la Federación un acuerdo presidencial que prohibía, a partir del 31 de mayo siguiente, las operaciones de aviación general en el AICM, mismas que fueron enviadas al Aeropuerto Internacional de Toluca, para descongestionar el aeropuerto capitalino. Las remodelaciones en el AICM continuaron, el 11 de abril de 1994 se pusieron en operación las instalaciones de la nueva Terminal Internacional, construida por una empresa privada conforme a un convenio de coinversión con ASA.

En 2001, se inauguró el ala Este del aeropuerto, utilizada principalmente por las aerolíneas pertenecientes a la alianza SKYTEAM⁴. Dicha obra consiste en una única sala de última espera, conectada al área internacional por un pasillo equipado con deslizadores de alta velocidad, para aminorar el tiempo de recorrido. En el 2002, se inició el proyecto llamado "Ampliación del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México a su máxima capacidad".

El 15 de noviembre del 2007 se inauguró la Terminal 2 de este aeropuerto. La inauguración oficial se llevó a cabo en marzo del 2008. Esta obra, que se realizó sin afectar las operaciones aéreas, permitió al AICM ofrecer mejores servicios y responder a la creciente demanda de pasajeros y operaciones (www.aicm.com.mx/archivos/BREVEHISTORIA2011.pdf).

1.5.2 Datos y características generales del AICM

Nombre: Licenciado Benito Juárez

Ubicación: México, DF

Distancia al centro de la Ciudad de México: 5 kilómetros

Clasificación: Internacional

Tipo: Metropolitano

Clave IATA: MEX

Clave OACI: MMMX

Superficie: 780.8 hectáreas

Elevación: 2,230 metros

Latitud: 19° 26' N

Longitud: 99° 04' W

Temperatura promedio: 25° C

Horario de operaciones: las 24 horas del día

⁴ SKYTEAM, es una alianza de líneas aéreas, fue la tercera unión de líneas aéreas fundada en el mundo y compite con las alianzas ONEWORLD y STARALLIANCE.

Número de pistas: 2

Tipo de pavimento: Asfáltico

Designación de pista 1: 05I – 23D

Dimensión de pista 1: 3,963 x 45 metros

Designación de pista 2: 05D – 23I

Dimensión de pista 1: 3,985 x 45 metros

Capacidad del conjunto de pistas: 61 operaciones/hora

Número de posiciones de atraque de Terminal 1: 56 (44 de contacto y 12 remotas)

Número de posiciones de atraque de Terminal 2: 51 (27 de contacto y 24 remotas)

Dentro de la infraestructura aeroportuaria del país destaca el AICM⁵, dado que ocupa el primer lugar en la actividad aérea nacional, atiende al 30% de los pasajeros, el 28.3% de las operaciones (despegues y aterrizajes) y da servicio al 50.6% de la carga aérea, tanto de vuelos domésticos como internacionales⁶. En las tablas 1.1 a 1.3 y las figuras 1.1 a 1.6, se muestran algunos datos estadísticos operacionales⁷ del AICM.

Tabla 1.1 Operaciones anuales del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, nacionales e internacionales

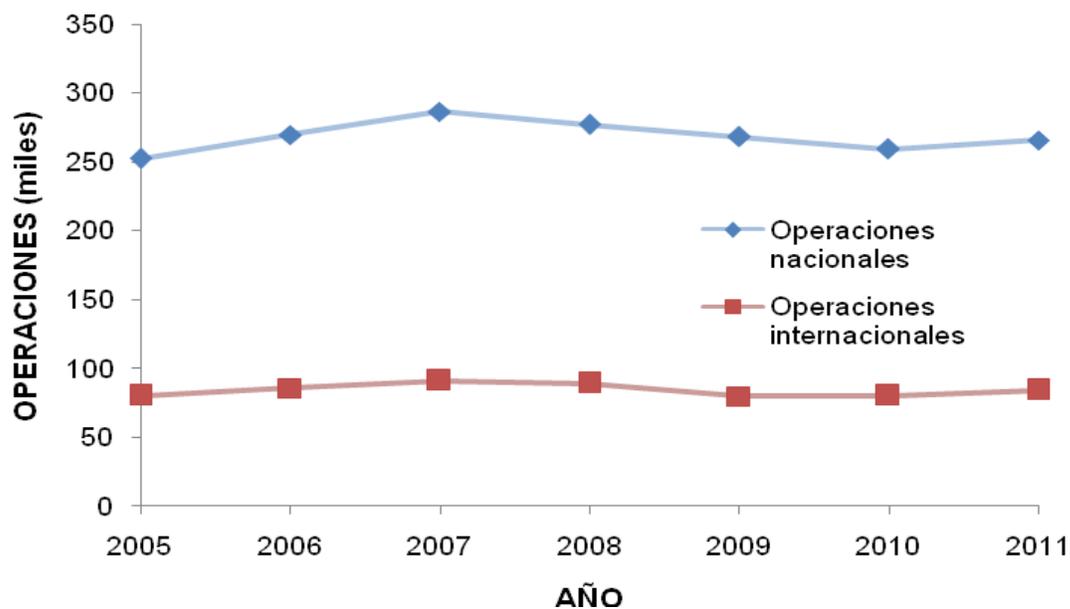
Año	Operaciones del AICM			Variación %		
	Nacional	Internacional	Total	Nacional	Internacional	Total
2005	252,472	80,151	332,623	-----	-----	-----
2006	269,719	85,874	355,593	6.8	7.1	6.9
2007	286,821	91,340	378,161	6.3	6.4	6.3
2008	277,294	89,267	366,561	-3.3	-2.3	-3.1
2009	268,252	80,054	348,306	-3.3	-10.3	-5.0
2010	259,470	80,428	339,898	-3.3	0.5	-2.4
2011	265,986	84,046	350,032	2.5	4.5	3.0

Fuente: Elaboración propia, con base en datos estadísticos del AICM.

⁵ El Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México es una de las principales infraestructuras en el ámbito mundial, dado que se encuentra en la posición número 52, en cuanto al movimiento de pasajeros y en el lugar 30, en relación con el número de operaciones efectuadas, durante 2011. Por otro lado, en cuanto al movimiento de carga aérea mundial el AICM ocupó el lugar 49, durante 2011 (ACI, 2012).

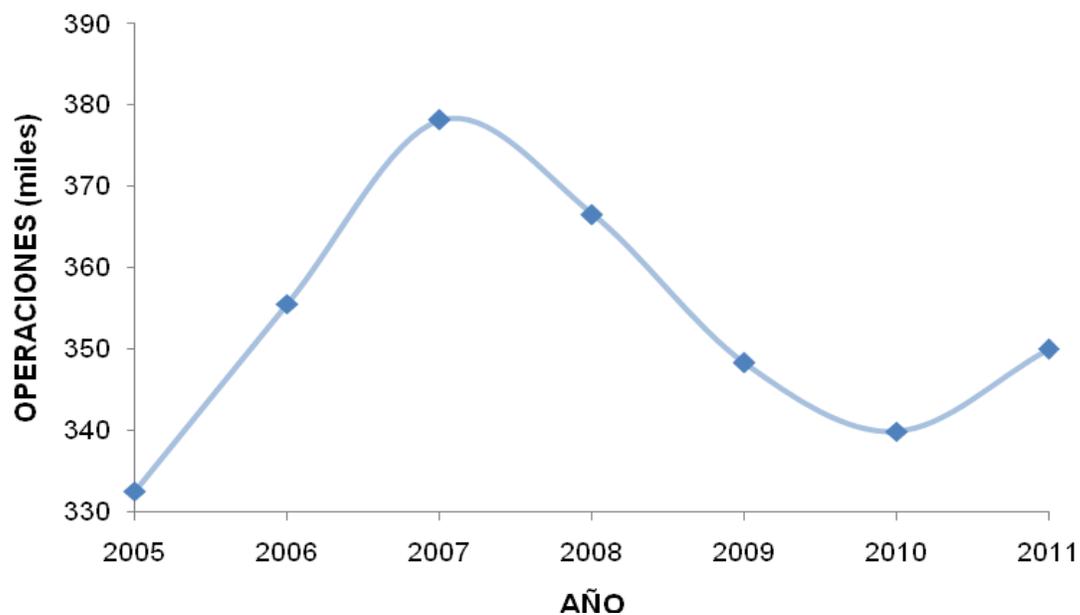
⁶ Valores obtenidos mediante el procesamiento de las bases de datos de la Dirección General de Aeronáutica Civil, de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, para el año 2008. Fuente: <http://www.sct.gob.mx/transporte-y-medicina-preventiva/aeronautica-civil/>.

⁷ Con base en información estadística mensual de las operaciones aéreas en el AICM, durante el periodo 2005-2011. Fuente: www.aicm.com.mx/archivos/Estadisticas.



Fuente: Elaboración propia, con base en datos estadísticos del AICM.

Figura 1.1 Operaciones anuales del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, nacionales e internacionales



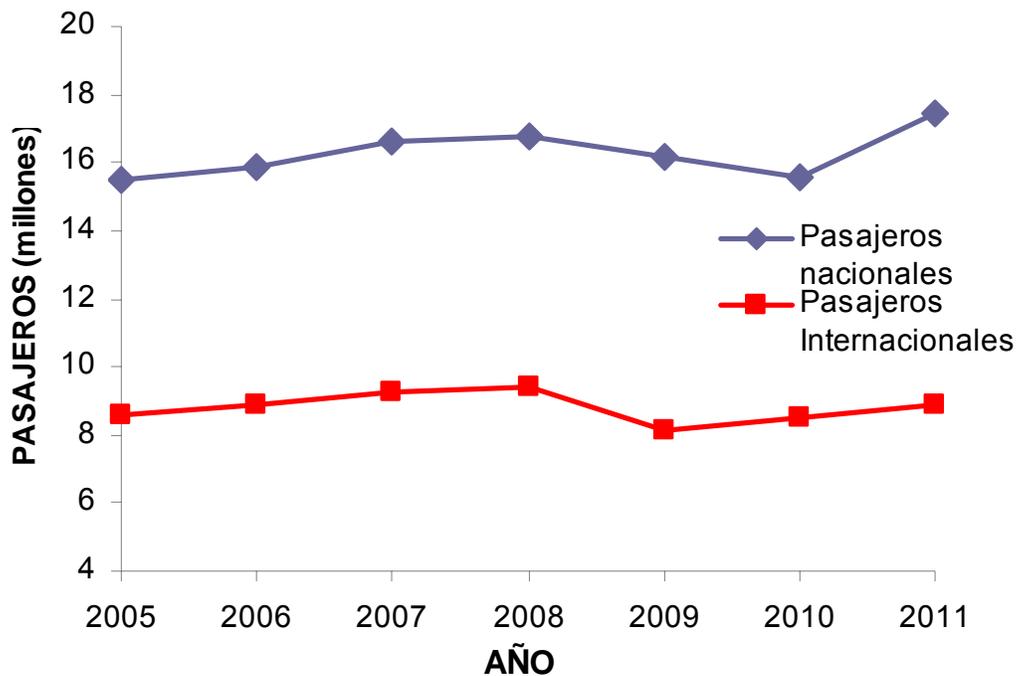
Fuente: Elaboración propia, con base en datos estadísticos del AICM.

Figura 1.2 Operaciones anuales totales del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México

Tabla 1.2 Movimiento de pasajeros en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, nacionales e internacionales

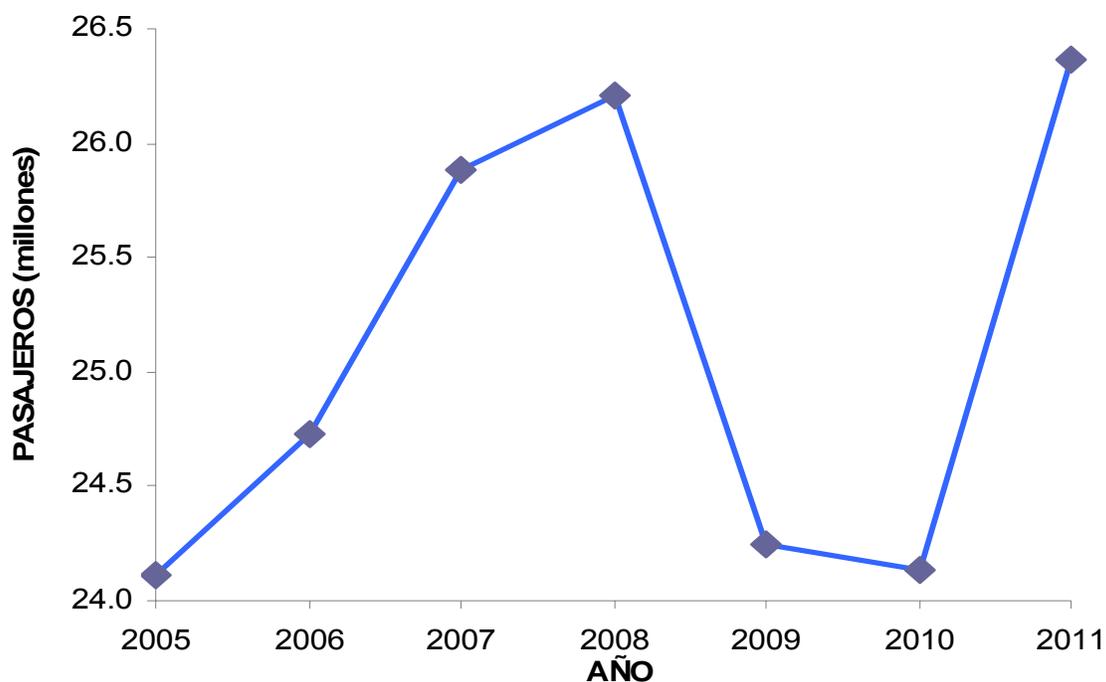
Año	Pasajeros del AICM			Variación %		
	Nacional	Internacional	Total	Nacional	Internacional	Total
2005	15,523,755	8,591,797	24,115,552			
2006	15,848,060	8,879,236	24,727,296	2.1	3.3	2.5
2007	16,592,422	9,289,240	25,881,662	4.7	4.6	4.7
2008	16,777,773	9,432,444	26,210,217	1.1	1.5	1.3
2009	16,142,330	8,100,726	24,243,056	-3.8	-14.1	-7.5
2010	15,587,068	8,543,467	24,130,535	-3.4	5.5	-0.5
2011	17,461,483	8,907,423	26,368,906	12.0	4.3	9.3

Fuente: Elaboración propia, con base en datos estadísticos del AICM.



Fuente: Elaboración propia, con base en datos estadísticos del AICM.

Figura 1.3 Movimiento de pasajeros en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, nacionales e internacionales



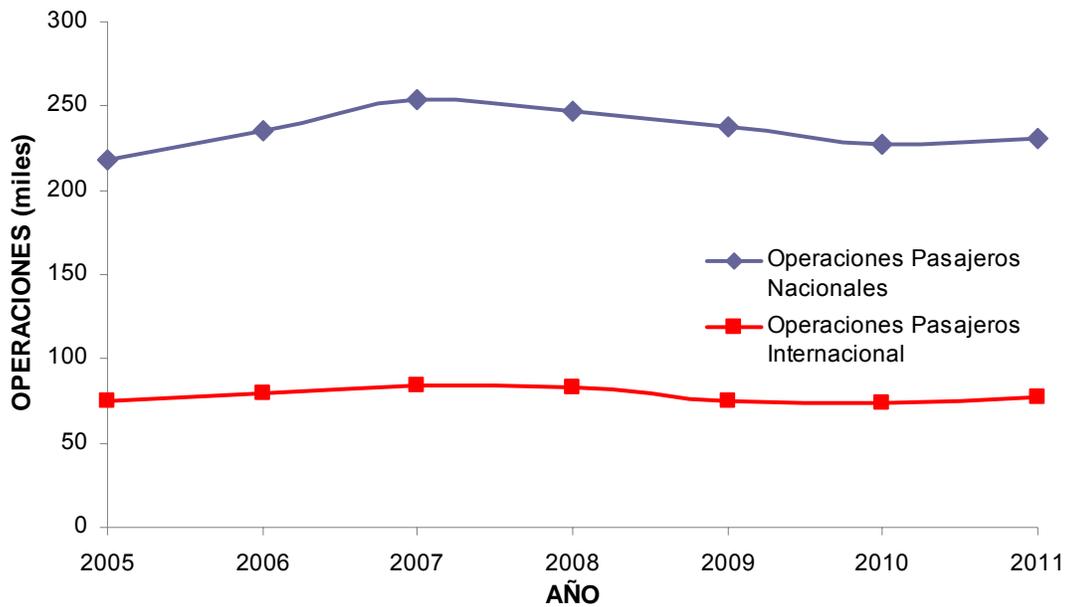
Fuente: Elaboración propia, con base en datos estadísticos del AICM.

Figura 1.4 Movimiento total de pasajeros en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México

Tabla 1.3 Operaciones anuales del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, nacionales e internacionales por origen y tipo

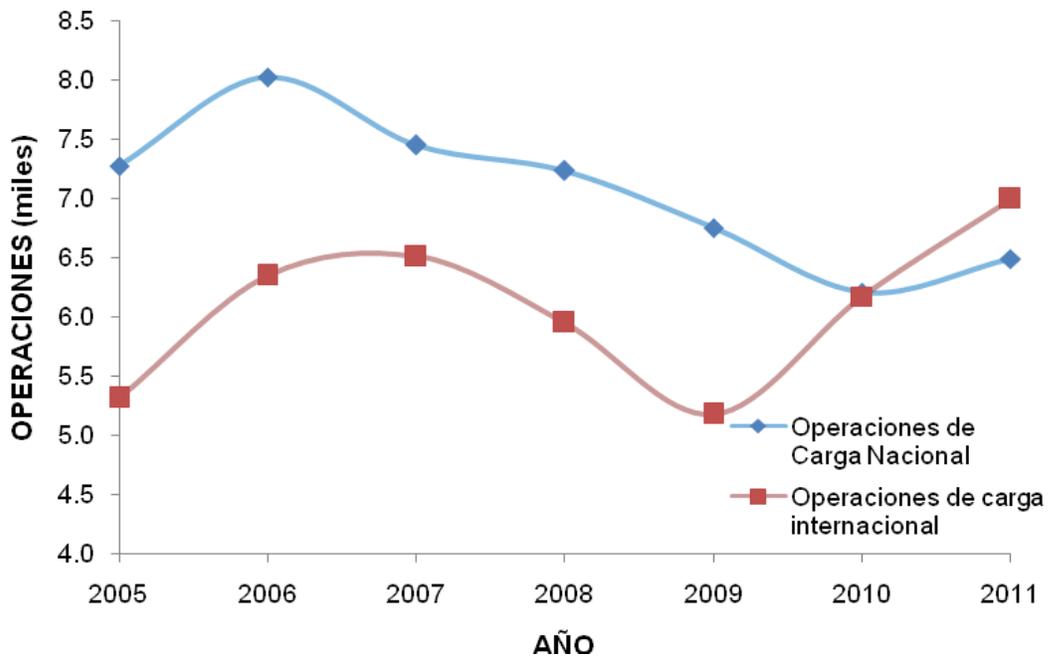
Año	OPERACIONES POR ORIGEN Y TIPO									
	Nacional			Internacional			Comercial pasajero		Carga	
	Comercial		Aviación general	Comercial		Aviación general	Var. %		VAR. %	
	Pasajero	Carga		Pasajero	Carga		Nacional	Internacional	Nacional	Internacional
2005	218,585	7,277	26,610	74,752	5,318	81				
2006	235,583	8,025	26,111	79,512	6,352	10	7.8	6.4	10.3	19.4
2007	253,635	7,454	25,732	84,800	6,514	26	7.7	6.7	-7.1	2.6
2008	246,850	7,237	23,207	83,196	5,956	115	-2.7	-1.9	-2.9	-8.6
2009	238,228	6,757	23,267	74,721	5,181	152	-3.5	-10.2	-6.6	-13.0
2010	227,477	6,212	25,781	74,058	6,176	194	-4.5	-0.9	-8.1	19.2
2011	230,820	6,496	28,670	76,832	6,999	215	1.5	3.7	4.6	13.3

Fuente: Elaboración propia, con base en datos estadísticos del AICM.



Fuente: Elaboración propia, con base en datos estadísticos del AICM.

Figura 1.5 Operaciones de pasajeros en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, nacionales e internacionales



Fuente: Elaboración propia, con base en datos estadísticos del AICM.

Figura 1.6 Operaciones de carga en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, nacionales e internacionales

1.6 Aspectos generales sobre el control del tránsito aéreo en el AICM

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 aeronaves como de la infraestructura aeroportuaria.

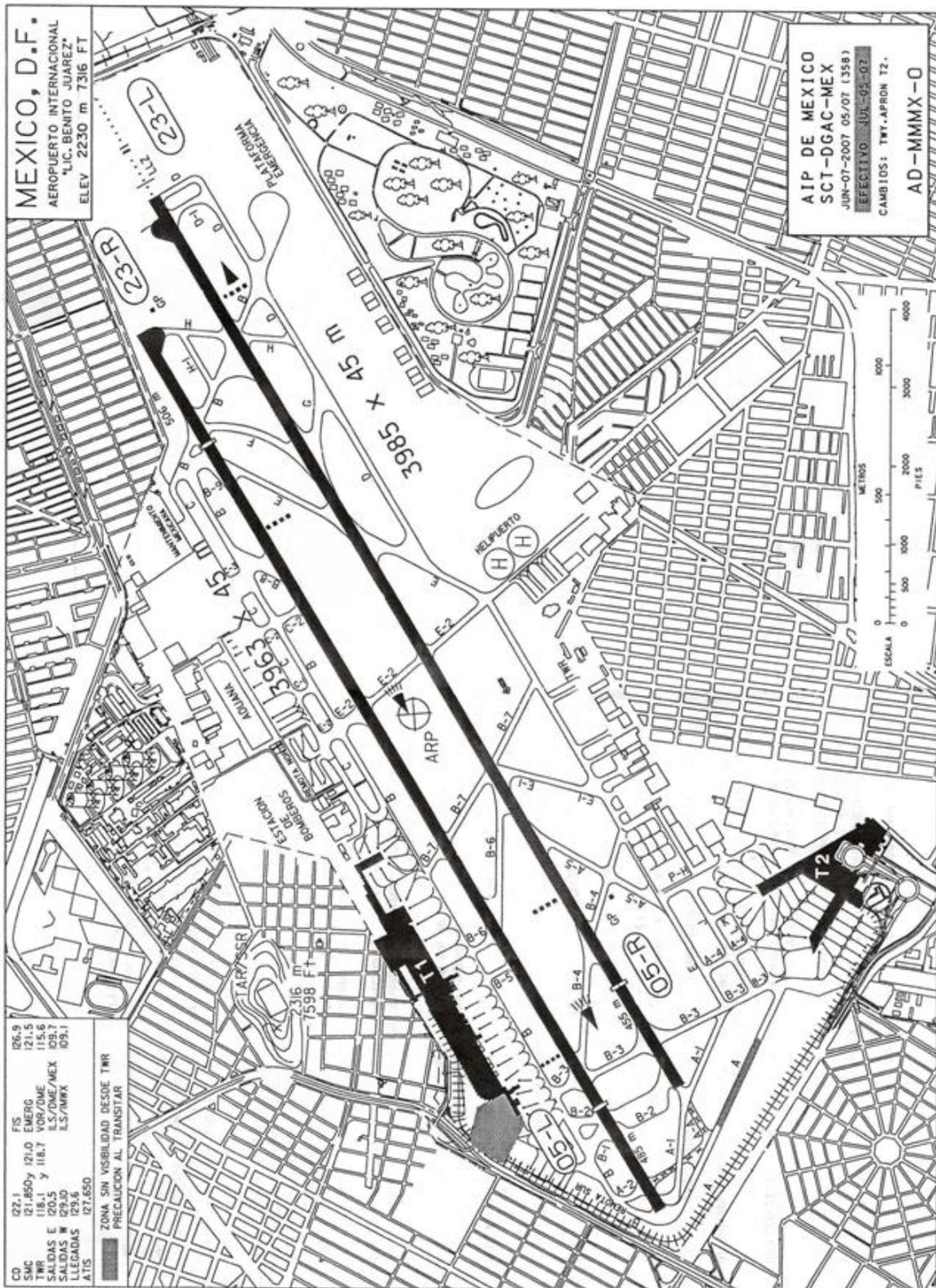
Para efectos del control del tránsito aéreo y navegación aérea se tienen dos tipos de reglas de vuelo, reglas de vuelo visual o VFR (*Visual Flight Rules*) y reglas de vuelo por instrumentos o IFR (*Instrument Flight Rules*). El término VFR se aplica cuando la condición del estado del tiempo es lo suficientemente buena para mantener la distancia mínima de separación por referencia visual, entre aeronaves, así como entre aeronaves y obstáculos.

La condición IFR se aplica cuando las condiciones mínimas de visibilidad y techo 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 bajo 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 se asignan rutas y altitudes, se acelera y mantiene el movimiento ordenado de aeronaves y se mantienen 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 terminales aéreas, así como mayores riesgos de colisiones. 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 (Herrera 2001).

En la Figura 1.7 se presenta el arreglo general del AICM, en donde se observan sus principales componentes: las dos pistas de aterrizaje, las diversas calles de rodaje y sus dos terminales T1 y T2.



Fuente: SCT, 2011.

Figura 1.7 Plano general del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México

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 maniobras y en las inmediaciones de un aeródromo con el fin de: (1) *prevenir* colisiones entre aeronaves, y entre aeronaves y obstáculos. (2) acelerar y mantener el movimiento ordenado de las aeronaves en su rodaje a plataforma, pista o 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 calles de rodaje, de expedir las autorizaciones necesarias a 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 óptimos, 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”. Escalonar varias aeronaves consiste en mantenerlas en un patrón reglamentario de trayectos rectos 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, 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 aerovías⁸. 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, alterno⁹ 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

⁸ Aerovía, es una ruta aérea definida por un área de control en forma de corredor, equipada con radio ayudas para la navegación aérea.

⁹ Aeródromo alterno, es un aeródromo especificado en el plan de vuelo, al cual una aeronave debe ir cuando resulte desaconsejable aterrizar en el aeródromo de destino.

de que ha transcurrido una hora sin que se tengan noticias de alguna aeronave en vuelo (Herrera, 2001).

2 Desarrollo del modelo de simulación

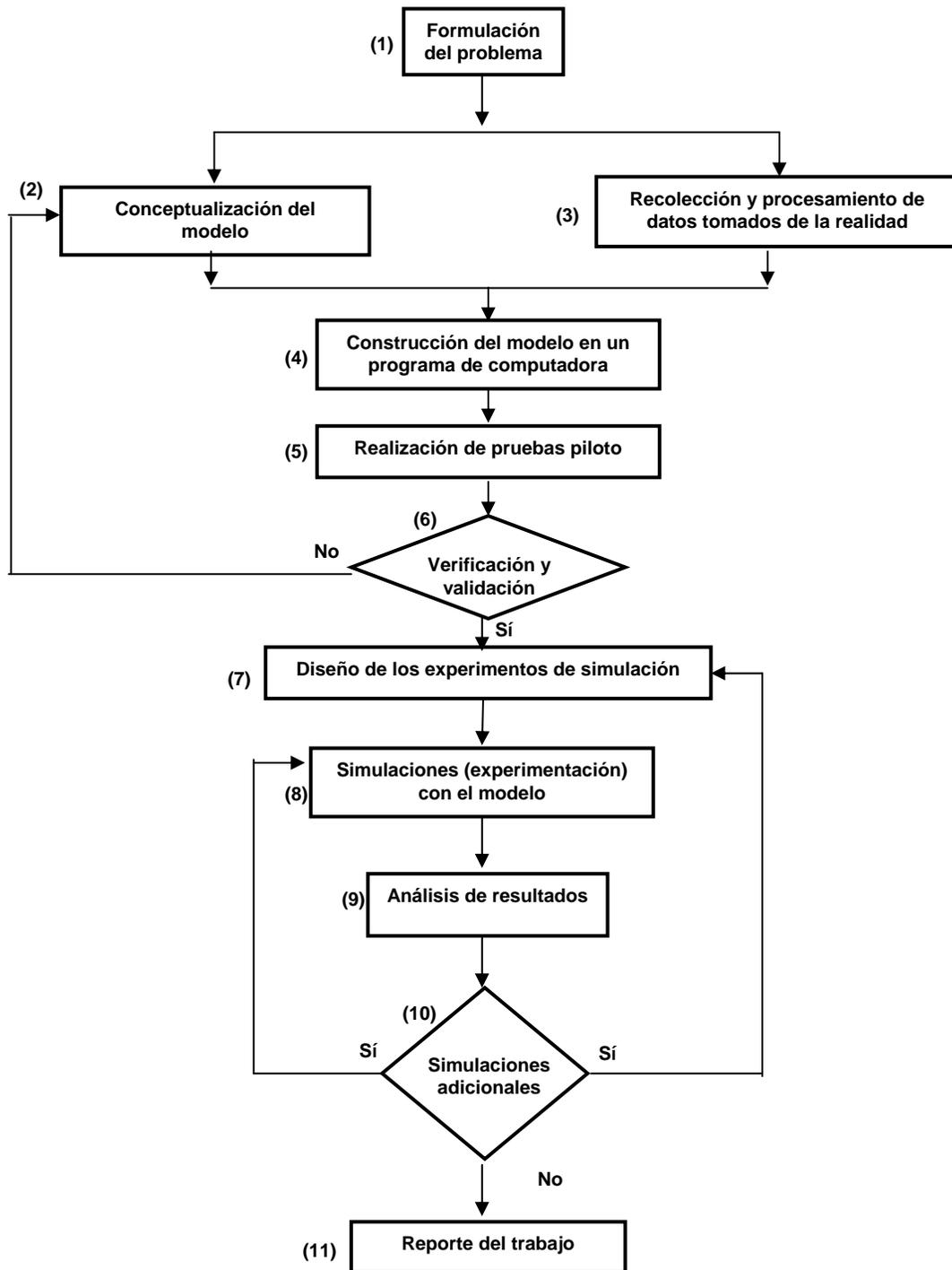
2.1 Planeación para la elaboración del modelo de simulación y su experimentación

Hay una secuencia de pasos que deben seguirse para la elaboración del modelo de simulación y para la realización de los experimentos con él. Los pasos que se siguieron se muestran en la Figura 2.1 Cada uno de los pasos de dicha figura ha sido numerado como referencia para los siguientes comentarios.

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.* La construcción de un modelo de simulación es tanto un arte como una ciencia (Banks, et al., 1996). 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. No es necesaria una copia paso a paso, entre el modelo y el sistema real, sólo es necesaria la esencia de este último. En esta etapa deben 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.* Hay una constante interacción entre la construcción del modelo y la recolección de los datos necesarios para su funcionamiento. Los objetivos del estudio establecen, en gran medida, la clase de datos que deben ser obtenidos. Éstos pueden conseguirse 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 cómputo que será utilizado y (b) la información de entrada y condiciones iniciales. En la mayoría de los programas de simulación, antes de realizar la codificación, se requiere elaborar un diagrama de flujo que describa la

secuencia lógica del movimiento de las transacciones del sistema que se está simulando. En cuanto a los programas de computación que se pueden utilizar para la codificación, existen en términos generales dos posibilidades, la primera es que se escriba el programa en un lenguaje general de programación como FORTRAN, VISUAL BASIC o C++, la otra posibilidad es que se utilice un programa especial para fines de simulación como FLEXSIM 5. 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. Si el modelo ha sido diseñado para un sistema ya existente, entonces la validación del modelo puede ser evaluada al comparar los resultados de las simulaciones del modelo contra los datos del comportamiento del sistema real. Si los comportamientos, entre el modelo y el sistema real, son consistentes, el modelo es válido. 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 utilizando el modelo de simulación. Algunos de los aspectos que se deben definir son las condiciones bajo las cuales se harán las simulaciones, su duración, y el número de simulaciones requeridas.
8. *Simulaciones con el modelo.* En este punto se realizan los experimentos diseñados en el paso anterior, con el propósito de obtener datos que midan el comportamiento del sistema simulado, considerando los distintos escenarios establecidos.



Fuente: Herrera, 2001.

Figura 2.1 Pasos para la elaboración del modelo de simulación y su experimentación

9. *Análisis de los resultados de las simulaciones.* Este paso implica el análisis estadístico de los resultados provenientes del paso anterior, con 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, conclusiones y otros datos pertinentes (Herrera, 2001).

2.1.1 Formulación del problema

Como se señaló en la introducción, el principal reto del AICM es la enorme demanda de servicios que debe atender, sin embargo, esta condición genera diversas dificultades y grandes retos.

Debido a que el AICM es la principal infraestructura aérea del país, también es la que genera los mayores volúmenes de gases contaminantes, derivados de la operación misma y adicionalmente por la congestión de aeronaves. Por lo anterior, sería deseable aplicar una estrategia de atención de aeronaves que disminuya dichas emisiones contaminantes. Para ello, la nueva estrategia cambia el orden de atención tradicional de las aeronaves, por otro que minimiza dichos valores.

Por lo anterior se desarrollará un modelo de simulación de eventos discretos del AICM, en donde se aplicará la estrategia propuesta, para compararla con la situación actual y determinar los beneficios potenciales, en términos de reducción de emisiones de gases contaminantes.

2.1.2 Modelo conceptual

Se puede considerar 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 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 “primeras entradas–primeras salidas” (FCFS, por sus siglas en inglés, *First-Come, First-Served*). 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, por no ser representativos.

Por otro lado, ya que la separación de las pistas del AICM (310 m), no permite operaciones simultáneas, sino solamente secuenciales, se puede considerar una primera restricción al modelo, la cual señala que ambas pistas no tienen autorización de dar servicio al mismo tiempo. Esta condición establece la capacidad actual del conjunto de las dos pistas del AICM de 61 operaciones/hora, o su equivalente, 1.02 operaciones/minuto, la cual será ocupada en la construcción del modelo.

En el AICM se tienen 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, intervalo en el que se registra un comportamiento de muy pocas operaciones aéreas. 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.

Es preciso indicar los principales tipos de aeronaves que operan en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México. Esta clasificación se estableció para las aeronaves que solicitan aterrizar o despegar dado que estas serán utilizadas como la fuente de generación de aeronaves para elaborar el modelo, y dado que el orden de atención de las aeronaves es establecido por el orden en que solicitan el servicio, se pueden considerar dos colas, una en despegues y otra en aterrizajes, antes hacer uso de cualquiera de las dos pistas disponibles. La clasificación de estas aeronaves se realizó tomando en cuenta el número de operaciones que se tiene a lo largo de cada periodo de prueba que se realizará, ordenándolas por tipo de aeronave y hora de operación, para posteriormente tomar los tipos de aeronaves con un número de muestra mayor que 10, con objeto de tener una muestra representativa. Los tipos de aeronave que no cumplen con la condición anterior fueron ordenados de acuerdo con su peso, clasificado por la estela turbulenta¹⁰ que generan, ya sea como aeronaves pequeñas (*small*), grandes (*large*) o pesadas (*heavy*).

Una vez determinados los principales tipos de aeronaves que operan en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, es de gran importancia conocer cómo es el funcionamiento del tránsito del parque aeronáutico dentro del “*lado aire*”¹¹ del AICM.

¹⁰ Un vórtice o torbellino, es una masa de aire que gira sobre si misma, alrededor de un eje de rotación denominado línea de vórtice. Los vórtices que dan lugar a la estela de turbulenta son producto de la sustentación y todos los aviones los producen mientras están en vuelo.

¹¹ Los aeropuertos se dividen en dos partes. El lado aire (del inglés *air-side*), que incluye las pistas (para aterrizajes y despegues), calles de rodaje y las posiciones de atraque de las aeronaves; y el

El movimiento del parque aéreo dentro del lado aire del AICM esta dado de la siguiente manera:

Tomando en cuenta el total de aterrizajes realizados en el AICM, se observó que a la Terminal 1 corresponde el 43.04% y a la Terminal 2, el 56.96%. En general, los aterrizajes se realizan en la pista 05-R (en el 82.32% de los casos), y si su destino es la Terminal 2, desalojan en el rodaje G (Golfo) en el 46.88% de los casos. Las aeronaves que tienen como destino la Terminal 1, desalojan la pista 05-R, por el rodaje F (Fox), E (Eco) o B (Bravo), en las siguientes proporciones 24.08%, 7.08% ó 3.54% respectivamente.

El resto de los aterrizajes (17.68%) se realiza en la pista 05-L, desalojando por el rodaje B-8, si el destino de las aeronaves es la Terminal 1. Por lo general, todas las aeronaves que aterrizan por la pista 05-L tienen como destino la Terminal 1.

Cuando las aeronaves aterrizan en la pista 05-R y tienen como destino la Terminal 1, deben cruzar por la pista 05-L al salir de su rodaje; esta situación genera otra restricción en el modelo, la cual consiste en que las aeronaves que se posicionen en las calles de rodaje E, F y B, no deben cruzar, a menos que la pista 05-L no presente servicio en ese momento.

La situación descrita anteriormente puede originar que los rodajes E, F y/o B se saturen, debido a que la longitud que presentan limita su capacidad. Esta restricción en el modelo establece que la pista 05-R no deberá prestar servicio cuando las calles de rodaje E, F y B se encuentren totalmente ocupadas. La capacidad máxima de cada uno de estos rodajes es de tres aeronaves.

Las restricciones mencionadas antes limitan el número de operaciones en las pistas y originan congestionamiento en el AICM, por lo que es de gran importancia considerarlas dentro del modelo.

Una vez que las aeronaves han desalojado las pistas y rodajes, son dirigidas a las plataformas, hangares o aduanas, de acuerdo con el tipo de vuelo y terminal de destino.

En la Tabla 2.1 se detalla la distribución de las posiciones por plataforma en cada terminal, las cuales fueron separadas por zonas comunes.

Se consideró que el proceso de aterrizaje termina una vez que las aeronaves son dirigidas, ya sea a la Terminal 1 ó la Terminal 2 y toman contacto con la posición de atraque asignada dentro de la plataforma de destino, por lo que este proceso también incluye el rodaje realizado por las aeronaves dentro de las instalaciones del aeropuerto.

lado tierra (del inglés *land-side*), que está dedicado a los usuarios e incluye terminal de pasajeros, zonas de comercio, aduanas, servicios y estacionamiento de automóviles.

Cuando las aeronaves han llegado a su posición de atraque, existe un tiempo de procesamiento, el cual incluye el tiempo de desembarque de pasajeros, carga y equipaje, el tiempo de carga del avión (equipaje, carga y combustible) y el tiempo de embarque de pasajeros. Durante este tiempo las aeronaves se encuentran estáticas y con los motores apagados, una vez que las aeronaves han cumplido con el tiempo de ocupación en cada posición asignada dentro de las plataformas, este proceso termina.

El proceso de despegue, dentro del modelo, termina una vez que las aeronaves desalojan la pista que ocuparon para esta operación y en ese momento se abre la posibilidad para realizar una nueva operación, ya sea despegue o aterrizaje, según se haya solicitado.

Tabla 2.1 Distribución de posiciones por terminal en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México

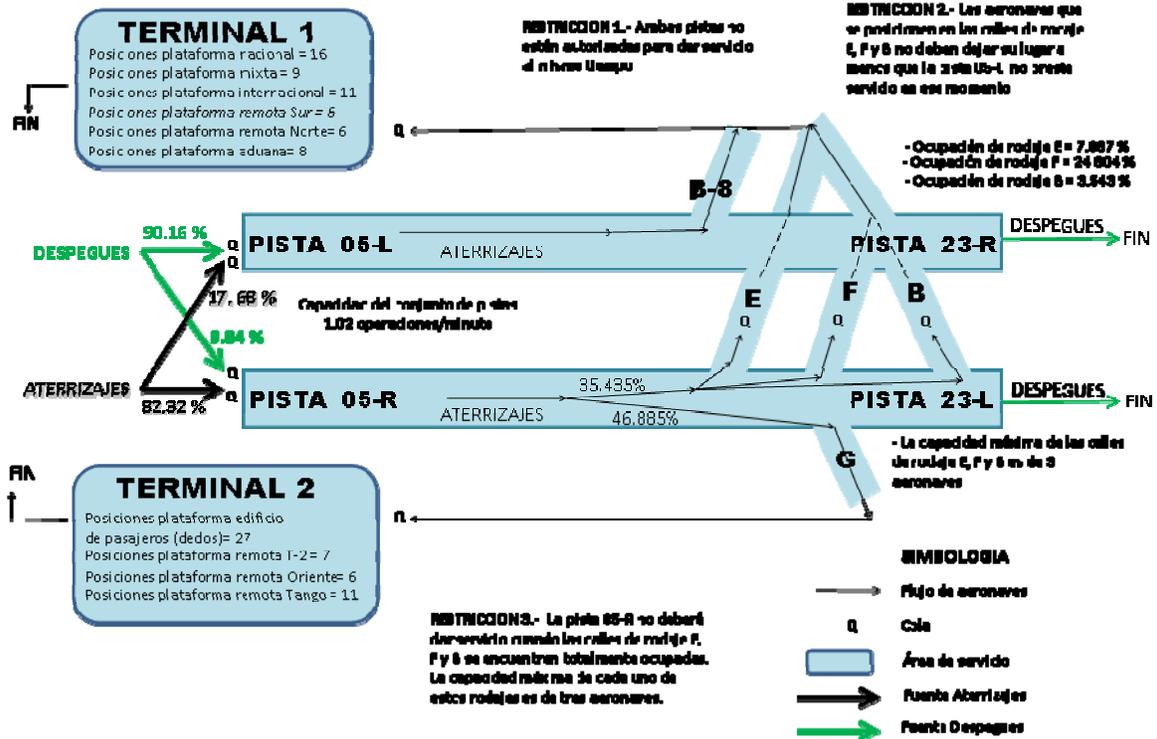
Terminal 1			Terminal 2	
Posiciones plataforma nacional	16		Posiciones edificio de pasajeros (dedos)	27
Posiciones plataforma mixta	9			
Posiciones plataforma internacional	11			
Posiciones plataforma remota Norte	6		Posiciones plataforma remota T-2	7
Posiciones plataforma remota Sur	6		Posiciones plataforma remota Oriente	6
Posiciones plataforma aduana	8		Posiciones plataforma remota Tango	11

Fuente: Elaboración propia, con base en datos de SCT, 2011.

La distribución típica de ocupación de las pistas por las aeronaves en la operación de despegue es la siguiente: pista 05-L, con un 90.16% y pista 05-R, con un 9.84%.

Con base en la información anterior se elaboró el modelo conceptual del sistema bajo estudio, el cual se muestra esquemáticamente en la Figura 2.2.

Otro detalle importante que se debe considerar en el modelo, es el de las unidades de tiempo a utilizar. Puesto que el intervalo requerido para atender una operación de aterrizaje o despegue, está en el rango de aproximadamente un minuto, será el minuto (‘) la unidad de medida utilizada en el desarrollo del modelo.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2.2 Modelo conceptual del sistema que representa a las operaciones de aterrizaje y despegue en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, así como capacidades de pistas, rodajes y posiciones en plataformas

2.1.3 Recolección y procesamiento de datos operativos

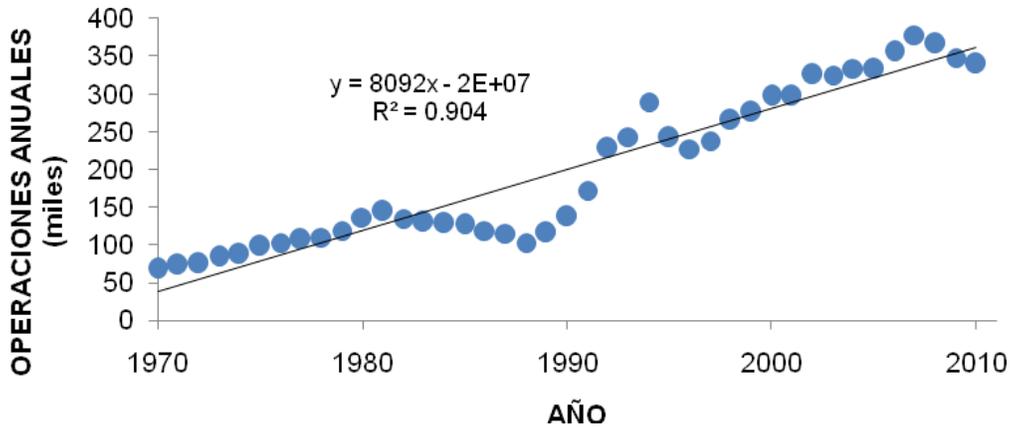
Con base en la información operativa estadística, se establecieron las distribuciones empíricas de los tiempos de llegada y salida de los principales tipos de aeronaves que operan dentro del aeropuerto, las cuales son la base para todas las fuentes (*sources*) que generan los flujos de aeronaves dentro del sistema que se modela.

Como primer paso es necesario conocer el comportamiento de las operaciones en el AICM, en el transcurso del tiempo, ya que esto nos permite tener un panorama de cómo plantear el modelo y la forma de operación del sistema.

En la Figura 2.3 se muestra la evolución de las operaciones totales en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, a lo largo del último cuarto del siglo pasado y hasta la última década del presente. En la figura es posible observar las fluctuaciones que ha tenido la actividad aérea en el AICM, tal es el caso del decremento que se presentó en 1982, después de un crecimiento sostenido que se había tenido durante la década de los setentas, derivado de la crisis económica que se presentó en dicho año. Estos efectos negativos se presentaron hasta el año de 1988, en donde comenzó un incremento de la actividad aérea hasta el año de 1994, con una tasa de crecimiento mayor a la de años anteriores, hasta que una nueva crisis económica en el país, surgida a finales de 1994 y principios de 1995, detuvo este crecimiento. Como consecuencia, las operaciones aéreas en el país y sobre todo en el AICM cayeron durante 1995 y 1996, para empezar a recuperarse a partir de 1997, teniendo nuevamente un periodo de crecimiento sostenido hasta 2007. La tendencia decreciente en años recientes se asocia con la crisis económica mundial (2008-2011) originada en Estados Unidos. Como consecuencia en 2010, una de las principales compañías aéreas del país, Mexicana de Aviación, con base de operaciones en el AICM, dejó de operar y quedó sujeta a un proceso judicial de concurso mercantil¹², disminuyendo aún más la actividad aérea en el AICM. En la Figura 2.3 la línea continua representa la tendencia de valores para todo el periodo señalado.

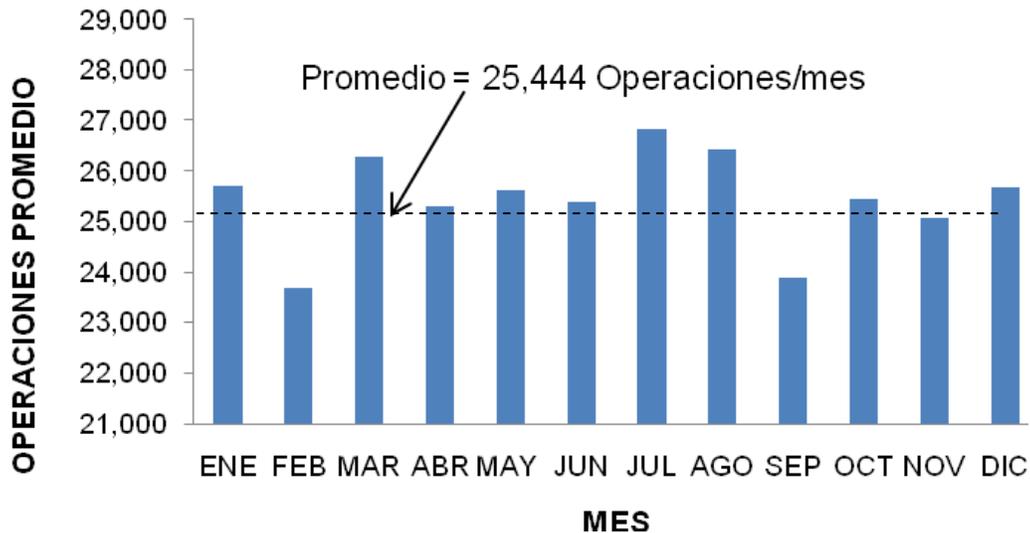
Una vez mostrado el comportamiento de la actividad aérea del AICM, a través de los años, es importante conocer el comportamiento de las operaciones durante los meses del año. En la Figura 2.4 se presenta el comportamiento del promedio de las operaciones aéreas por mes en el AICM, para la aviación comercial, durante la segunda mitad de la última década, en la cual se observan las fluctuaciones mensuales. La variación que se observa se debe a la diferencia de días que tiene cada mes del año, debido a que no todos tienen el mismo número de días, algunos meses presentan mayor o menor número de operaciones. Esta situación se puede estandarizar obteniendo el promedio de operaciones a lo largo del año, el cual es de 25,444 operaciones por mes, con una desviación estándar de 1,013 operaciones, esto con la finalidad de poder observar con claridad el comportamiento de la actividad aérea a lo largo del año y tener un parámetro de referencia del número de operaciones.

¹² Situación en la cual un empresario o una sociedad mercantil se encuentra cuando no puede pagar la totalidad de las deudas que tiene con sus acreedores por falta de liquidez. Es un procedimiento que tiene por objeto llegar a un acuerdo entre el deudor y los acreedores, bajo supervisión judicial, sobre el monto que se pagará finalmente. La diferencia con la quiebra se encuentra en que en el concurso mercantil, el deudor tiene suficientes activos para hacer frente a sus deudas, pero éstos no son lo suficientemente líquidos.



Fuente: Elaboración propia, con base en datos de Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA); SCT, 2009; y estadísticas del AICM.

Figura 2.3 Evolución del número de operaciones de la aviación comercial del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México

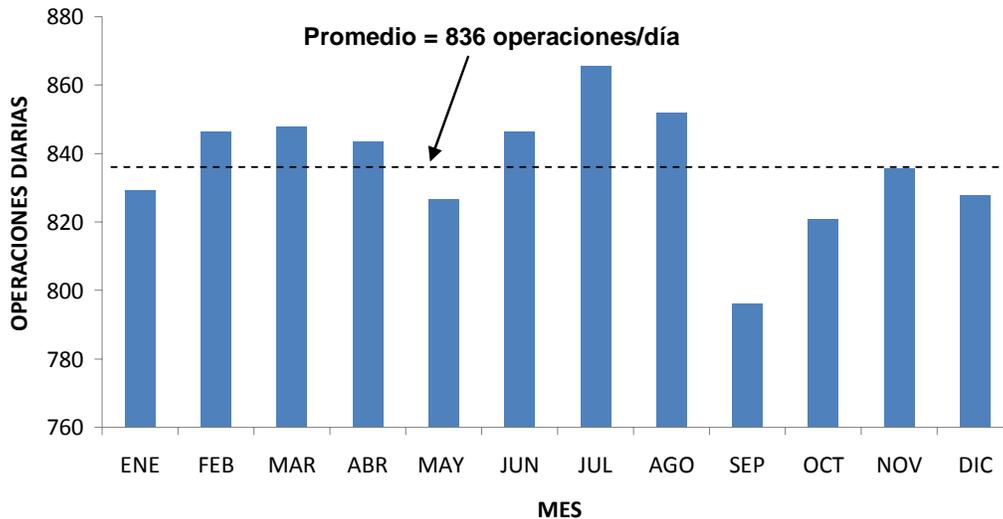


Fuente: Elaboración propia, con base en datos de Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA); SCT, 2009; y estadísticas del AICM.

Figura 2.4 Operaciones promedio por mes, del año 2005 al año 2010, para la aviación comercial, del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México

También, se revisaron las operaciones diarias por mes de la aviación comercial en el AICM. En la Figura 2.5 se han graficado las operaciones diarias promedio para cada uno de los meses del año, durante el periodo 2005 – 2010. Como se

observa, la variación entre el número de operaciones diarias por mes, es relativamente baja, a pesar de haber tomado un rango de seis años en su elaboración. Además, se observa que los valores promedio por mes están cerca de promedio, el cual es de 836 operaciones por día, con una desviación estándar de 20 operaciones.



Fuente: Elaboración propia, con base en datos de Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA); SCT, 2009; y estadísticas del AICM.

Figura 2.5 Operaciones promedio por día del año 2005 al año 2010, para la aviación comercial, del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México

En la Tabla 2.2 se detallan los porcentajes de operaciones de la aviación comercial y de la aviación general en los últimos 5 años. Se observa que el mayor porcentaje de operaciones anuales corresponde a la aviación comercial, con un 92.29%, y el restante 7.71% corresponde a la aviación general. Cabe señalar que dentro de la aviación general se encuentran las aeronaves privadas nacionales e internacionales, y las aeronaves de Estado, o también conocidas como oficiales.

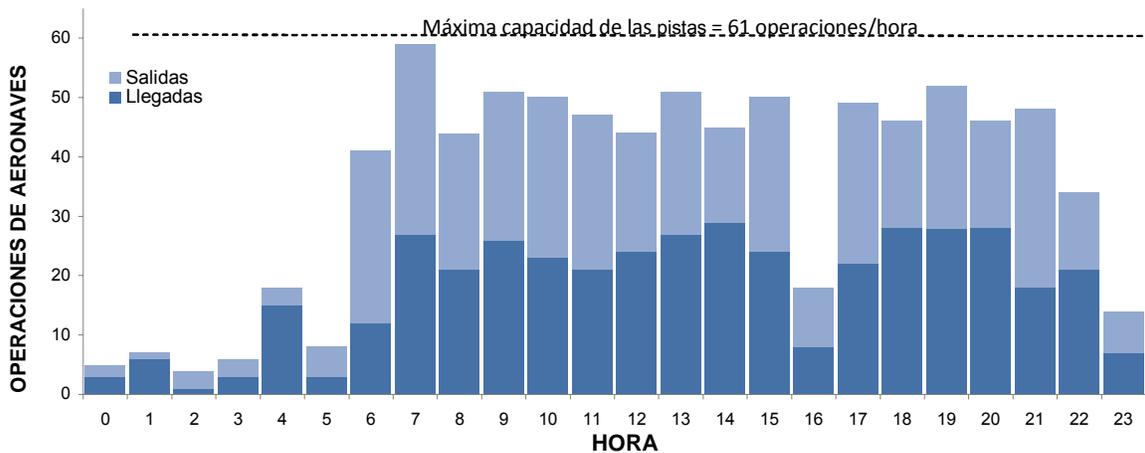
En la Figura 2.6 se ilustra el comportamiento de las operaciones IFR del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, para la aviación comercial, en un día típico de operaciones (enero de 2011). En esta figura se observa la existencia de dos patrones marcados en el comportamiento del número de operaciones por hora, a lo largo del día. El primero se encuentra entre las 0 y 6 horas; en este intervalo se registra muy poca actividad, con tan solo 48 operaciones (31 aterrizajes y 17 despegues), las cuales representan el 5.73% del total de operaciones diarias.

Tabla 2.2 Porcentajes de operaciones de la aviación comercial y aviación general del año 2005 al año 2010, en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México

Año	Aviacion comercial (%)	Aviacion general (%)
2005	91.28	8.72
2006	92.07	7.93
2007	92.69	7.31
2008	93.21	6.79
2009	92.79	7.21
2010	91.73	8.27
Promedio	92.29	7.71

Fuente: Elaboración propia, con base en datos de SCT, 2009; y estadísticas del AICM.

El segundo comportamiento se observa después de las 6 horas y hasta la media noche. Durante esta etapa se efectuó el mayor número de operaciones (789 operaciones, distribuidas en 394 aterrizajes y 395 despegues), lo que representa el 94.27% de las operaciones totales diarias del AICM. Observe cómo la actividad después de las 6 horas se incrementa, y además, cómo durante las primeras horas se presentan más despegues que aterrizajes, en cambio por la tarde-noche sucede un proceso inverso, de esta forma durante un día completo de operación se equilibra la cantidad de salidas con la de llegadas.

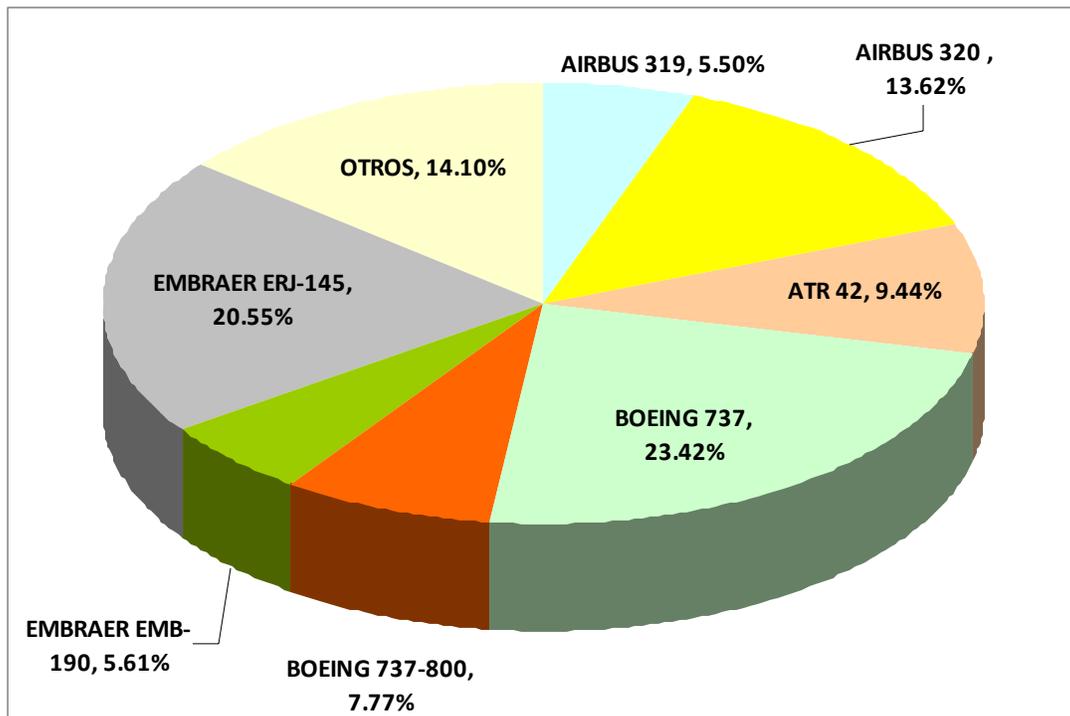


Fuente: Elaboración propia, con base en información de SENEAM.

Figura 2.6 Operaciones de la aviación comercial (IFR), del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, durante un día típico de enero de 2011

Derivado del análisis anterior se tomó la decisión de que la simulación se divida en dos submodelos que representen cada uno de estos comportamientos; el primero abarca el periodo de las 0 a las 6 horas, y el segundo de las 6 a las 24 horas.

Por otro lado, en la Figura 2.7 se muestran los porcentajes de operaciones realizadas en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, por los distintos tipos de aeronaves de la aviación comercial. En total fueron observados 39 tipos diferentes de aeronaves, sin embargo, fueron siete los tipos de aeronaves que presentan la mayor demanda de servicio, el resto se encuentra agrupado dentro de "Otros", ya que su demanda de servicio es reducida. La concentración de las operaciones en ciertos tipos de aeronaves es más marcada en algunos tipos, por ejemplo, el Boeing 737, el Embraer ERJ-145, y el Airbus 320, concentran más de la mitad (57.58%) de las operaciones de despegue y aterrizaje.



Fuente: Elaboración propia, con base en información de SENEAM.

Figura 2.7 Porcentaje de operaciones realizadas por los distintos tipos de aeronaves de la aviación comercial, en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, durante un día típico de 2011

2.1.3.1 Distribuciones de probabilidad y pruebas de bondad de ajuste de las tasas de llegada y salida de aeronaves

Con base en los tiempos de llegada y salida de las aeronaves al AICM, es posible obtener funciones de densidad de probabilidad (fdp) empíricas, con el objeto de posteriormente determinar fdp teóricas que describan dichos comportamientos. Posteriormente, estas fdp teóricas serán utilizadas para el desarrollo del modelo de simulación en un programa de computadora.

Como primer paso en la obtención de estas fdp se determinó el tamaño mínimo de muestra, con el propósito de establecer valores representativos para cada tipo de aeronave que opera en el AICM. Para ello, inicialmente se obtuvo el número de operaciones que realiza cada tipo de aeronave por día, procediendo posteriormente a determinar el tamaño mínimo de muestra, el cual fue de diez aeronaves ($n=10$). Con base en el tamaño mínimo de muestra se agruparon los diferentes tipos de aeronaves que cumplieron esta condición, lo cual arrojó los 7 principales tipos de aeronaves que se muestran en la Figura 2.7, más el grupo de “otros tipos”.

Con el fin de asignar un tipo específico de aeronave a cada una de las pertenecientes al grupo de “otros tipos”, éstas fueron agrupadas de acuerdo con la clasificación de estela de turbulencia, la cual está definida en función del máximo peso de despegue certificado (FAA, 2010). La clasificación es la siguiente: *pesada*, son aquellas aeronaves con un peso superior a 255,000 libras; *grande*, aeronaves de más de 41,000 libras y hasta 255,000 libras; y *chica*, para aeronaves de hasta 41,000 libras.

De acuerdo con la clasificación anterior se obtuvieron 10 grupos, que fueron los incorporados en el modelo de simulación, estos son: Airbus 320, Airbus 319, ATR-42, Boeing 737, Boeing 737-800, Embraer EMB-190, Embraer ERJ-145, clase pesada, clase grande y clase pequeña.

Debido a la reducida actividad aérea en el periodo de las 0 a las 6 horas, no es posible obtener el número de muestra mínimo representativo para algún tipo de aeronave, por lo cual, para este intervalo de simulación todas las operaciones fueron incluidas en dos grupos, uno para despegues y otro para aterrizajes.

Con objeto de estimar las fdp de los tiempos entre llegadas y salidas en el AICM, para los principales grupos de aeronaves señalados antes, primero se registró la hora en que las aeronaves aterrizaron y/o despegaron del aeropuerto. Con base en esta información se obtuvieron los tiempos entre llegadas y entre salidas, al calcular las diferencias sucesivas entre cada una de estas operaciones. Posteriormente, estos datos fueron resumidos en histogramas de frecuencias, a partir de los cuales se determinaron las fdp empíricas asociadas. Enseguida, mediante las pruebas de bondad de ajuste Kolmogorov-Smirnov y Anderson-Darling, se probó que las fdp empíricas se podían modelar mediante fdp teóricas conocidas. Para la aplicación de la metodología descrita anteriormente se utilizó información operacional proporcionada por SENEAM, para un día típico del mes de enero de 2011.

El cálculo de las pruebas de bondad de ajuste y de las funciones de densidad de probabilidad fueron realizadas con ayuda del paquete de cómputo *ExpertFit*¹³. Con

¹³ Es una aplicación incluida dentro del programa de simulación *FLEXSIM*, que sirve para ajustar distribuciones de probabilidad de datos. Es un auxiliar en el análisis completo de datos y es utilizado en la manufactura, transporte, salud, entre otros sectores.

ayuda de este programa fue posible analizar las distribuciones de probabilidad empírica y obtener una función de densidad probabilística conocida. A continuación se muestra un ejemplo para obtener una función de densidad de probabilidad y la prueba de bondad de ajuste respectiva, para los aterrizajes de las aeronaves Airbus 319, para el periodo de las 6 a las 24 horas. Como se observa en la Tabla 2.3, se obtuvo en este caso una función de densidad de probabilidad tipo gama, con los parámetros mostrados.

Tabla 2.3 Asignación de la función de densidad de probabilidad para los aterrizajes de aeronaves Airbus 319, para el periodo de las 6 a las 24 horas, en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México

Flexsim Representation of Model 1 - Gamma	
use:	
Distribution	Gamma
Location	0.000000
Scale	36.556573
Shape	1.192976

Fuente: Datos obtenidos mediante el software ExpertFit, con base en información de SENEAM.

Los respectivas pruebas de bondad de ajuste, Anderson-Darling y Kolmogorov–Smirnov, para distintos niveles de significancia alfa, se muestran en la Tabla 2.4 y 2.5. Los valores de bondad de ajuste críticos se obtuvieron al considerar un nivel de significancia $\alpha = 0.05$ para rechazar la hipótesis.

Tabla 2.4 Prueba de bondad de ajuste Anderson-Darling para la fdp gama, de los aterrizajes de aeronaves Airbus 319, para el periodo de las 6 a las 24 horas, en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México

Anderson-Darling Test with Model 1 - Gamma						
Sample size	18					
Test statistic	0.26318					
Note:	The following critical values are approximate.					
	Critical Values for Level of Significance (alpha)					
Sample Size	0.25	0.1	0.05	0.025	0.01	0.005
18	0.483	0.653	0.781	0.91	1.074	1.216
Reject?	No					

Fuente: Datos obtenidos mediante el software ExpertFit, con base en información de SENEAM.

Tabla 2.5 Prueba de bondad de ajuste Kolmogorov-Smirnov para la fdp gama, de los aterrizajes de aeronaves Airbus 319, para el periodo de las 6 a las 24 horas, en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México

Kolmogorov-Smirnov Test with Model 1 - Gamma					
Sample size	18				
Normal test statistic	0.11653				
Modified test statistic	0.49439				
Note: No critical values exist for this special case. The following critical values are for the case where all parameters are known, and are conservative.					
Critical Values for Level of Significance (alpha)					
Sample Size	0.15	0.1	0.05	0.025	0.01
18	1.1	1.183	1.313	1.431	1.574
Reject?	No				
A Chi-square test requires at least four intervals and there are three.					

Fuente: Datos obtenidos mediante el software ExpertFit, con base en información de SENEAM.

Como se observa, en ninguna de los dos pruebas de bondad de ajuste se rechaza la distribución para el nivel de significancia $\alpha = 0.05$, por lo tanto, se utilizó la distribución gama para representar los aterrizajes de aeronaves Airbus 319 en el periodo de las 6 a las 24 horas. A continuación se presenta un resumen de las funciones de densidad de probabilidad que corresponden a cada uno de los grupos de aeronaves a modelar, para los dos intervalos de operación, tanto para aterrizajes como despegues.

Tabla 2.6 Funciones de densidad de probabilidad de los despegues y aterrizajes, para el periodo de las 0 a las 6 horas, en el AICM

Operación	Función de densidad de probabilidad
Despegues	Johnsonbounded (0.90892, 68.631, 0.73820, 0.41987)
Aterrizajes	beta(0.81863, 121.62, 0.50064, 5.3170)

Fuente: Elaboración propia, datos obtenidos mediante el software ExpertFit, con base en información de SENEAM.

Tabla 2.7 Funciones de densidad de probabilidad de los despegues, para el periodo de las 6 a las 24 horas, en el AICM

Tipo de aeronave	Función de densidad de probabilidad
Airbus A319	Weibull (0.6180, 46.16, 0.8675)
Airbus A320	Johnson SB (0.0132, 101.8, 1.525, 0.7471)
ATR-42	Weibull (0.0, 23.89, 1.100)
Boeing 737	Weibull (0.5622, 10.28, 0.8688)
Boeing 737-800	Beta (0.5616, 89.78, 0.5861, 1.198)
Embraer EMB-190	Lognormal (0.6311, 14.37, 1.537)
Embraer ERJ-145	Erlang (0.0, 11.72, 1.0)
Pesada	Lognormal (1.783, 12.79, 1.860)
Grande	Pearson T6 (0.1801, 209.4, 1.065, 4.835)
Pequeña	Pearson T6 (0.0, 129.2, 1.129, 2.721)

Fuente: Elaboración propia, datos obtenidos mediante el software ExpertFit, con base en información de SENEAM.

Tabla 2.8 Funciones de densidad de probabilidad de los aterrizajes, para el periodo de las 6 a las 24 horas, en el AICM

Tipo de aeronave	Función de densidad de probabilidad
Airbus A319	Gamma (0.0, 36.55, 1.192)
Airbus A320	Pearson T6 (0.7073, 1881.9, 0.8533, 98.48)
ATR-42	Weibull (0.0, 24.37, 1.165)
Boeing 737	Erlang (0.9220, 10.62, 1.0)
Boeing 737-800	Lognormal (0.0, 15.55, 1.090)
Embraer EMB-190	Johnson SB (0.0344, 311.8, 1.557, 0.6242)
Embraer ERJ-145	Weibull (0.5278, 10.83, 0.8915)
Pesada	Johnson SB (2.469, 539.9, 1.700, 0.5790)
Grande	Gamma (3.819, 105.9, 0.7767)
Pequeña	Beta (0.8530, 413.4, 0.5496, 3.784)

Fuente: Elaboración propia, datos obtenidos mediante el software ExpertFit, con base en información de SENEAM.

2.1.4 Construcción del modelo en un programa de computadora

En este punto se describen los pasos considerados para la construcción del modelo, en particular se incluye la elección del programa de computadora para su desarrollo y la descripción general de su construcción.

2.1.4.1 Selección del programa de computadora

Debido a los requerimientos para simular las operaciones del AICM con el nivel de detalle señalado antes, es necesario contar con un programa flexible que permita crear modelos complejos en corto tiempo. Un programa que brinda estas características es el FLEXSIM. A continuación se describen brevemente las características que hacen de este programa el apropiado para construir los modelos de operaciones de despegue y aterrizaje del AICM. La versión 5 de FLEXSIM utiliza objetos altamente desarrollados que representan actividades y colas de proceso. Para utilizar un objeto en el modelo sólo se debe arrastrar y pegar desde la biblioteca al modelo. Cada objeto puede tener una localización (x, y, z), una velocidad (x, y, z), rotación y un comportamiento dinámico (tiempo). Los objetos se pueden crear, destruir y mover fácilmente. Pueden tener su propia funcionalidad o heredarla de otros objetos. Estos objetos dan como resultado distintos parámetros y características dominantes que ayudan a modelar fácil y eficazmente. FLEXSIM permite utilizar diversos objetos físicos como máquinas, operadores, transportadores, almacenes, semáforos, tanques, cajas, plataformas, etcétera. Este programa tiene una biblioteca robusta, que además permite importar figuras, en dos (2D) o tres dimensiones (3D), elaboradas en otros programas especializados. Todos los objetos que utiliza manejan el concepto de herencia, con lo que se logra acortar los tiempos de desarrollo. También, permite que el usuario haga uso completo de las características jerárquicas que provee Visual C++ de Microsoft. Debido a que los objetos de FLEXSIM están abiertos al diseñador, las bibliotecas y modelos elaborados se pueden intercambiar entre los

usuarios. Lo anterior, aunado al hecho de que los objetos pueden ser modificados completamente para requisitos particulares, reduce el tiempo requerido para elaborar el modelo. Para que los objetos modificados con requisitos particulares se puedan agregar a la biblioteca, basta con arrastrarlos y pegarlos, sin necesidad de reconstruirlos en cada nuevo modelo.

El programa FLEXSIM contiene un motor extremadamente rápido para ejecutar grandes cantidades de eventos en un mínimo de tiempo. El motor dirige la simulación y la visualización del modelo, además, se tiene la opción de apagar la visualización para acelerar aun más la simulación. También, posee una gran capacidad gráfica que permite visualizar los modelos en 3D, esta característica permite observar y explicar los procesos asociados con los despegues y aterrizajes dentro del aeropuerto, y de esta forma comprender con mayor facilidad dicho proceso.

2.1.4.2 Descripción de la construcción del modelo de simulación

Antes de comenzar con el modelo es conveniente entender los términos básicos del programa. FLEXSIM utiliza un ambiente de modelación tridimensional, la vista predeterminada para la construcción del modelo es la vista ortogonal. También puede verse el modelo en una forma más realista utilizando la vista en perspectiva, pero generalmente es más fácil construir el modelo con la vista ortogonal.

Los elementos del modelo de un sistema utilizando FLEXSIM son los siguientes:

Objetos: Son artículos que fluyen a través del sistema.

Estados del sistema: Condición del sistema en un momento t .

Evento: Cambios en los estados del sistema.

Elementos: Son los recursos del sistema que no son *Objetos*.

Localizaciones: Lugares por donde deben esperar o fluir los objetos.

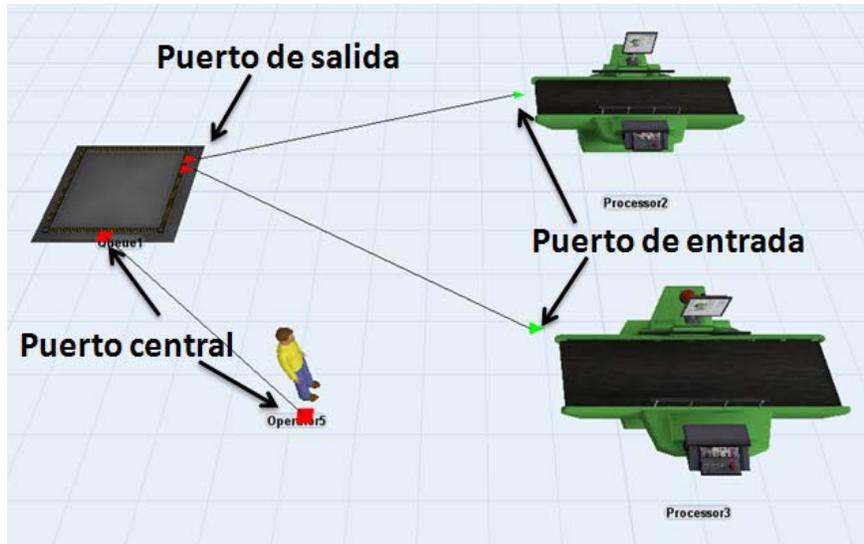
Atributos: Características de una entidad (etiquetas, tipo de objeto, etc.).

Variables: Condiciones cuyos valores se crean o se modifican (variables, etiquetas, etc.).

Controles: Reglas que gobiernan el sistema (disparadores, tablas de flujo, etc.).

Puertos: Cada elemento de FLEXSIM tiene un número ilimitado de puertos, a través de los cuales se comunican con otros elementos. Existe tres tipos de puertos: puertos de entrada, puertos de salida y puertos centrales. Los puertos de entrada y de salida, se usan para definir la ruta que los objetos seguirán a lo largo

del sistema, y los puertos centrales, son utilizados para crear referencias entre un elemento y otro (Masini y Toucet, 2010). Estos puertos se ven de manera gráfica en la Figura 2.8.



Fuente: Elaboración propia utilizando FLEXSIM 5.

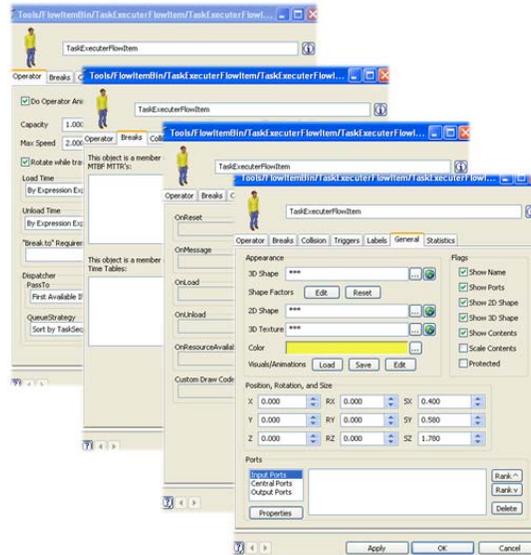
Figura 2.8 Descripción de los diferentes tipos de puertos utilizados para la modelación de sistemas en FLEXSIM

GUI: Cada objeto tiene su propia interfaz gráfica del usuario, conocida como GUI por sus siglas en inglés (*Graphical User Interface*), que sirve para añadir los datos y la lógica (Figura 2.9).

Propiedades de los elementos: La ventana de propiedades de los elementos es muy similar para cualquier elemento. En ésta se tienen pestañas compartidas en su parte superior (Figura 2.10), las cuales son las siguientes:

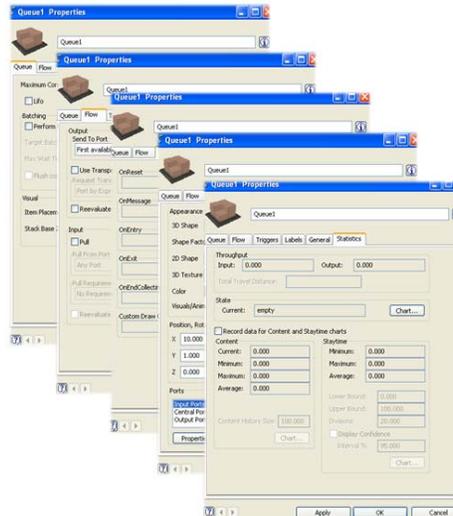
- a) *Flow*: Esta pestaña contiene la información y descripción de la forma en que será el flujo de un objeto, desde un elemento hacia otro, ya sea a la entrada o salida de éste.
- b) *Triggers*: Esta pestaña contiene la lista de disparadores que permiten la operación y coordinación de cada uno de los elementos interconectados, en diversos tiempos y escenarios del modelo.
- c) *Label*: Esta pestaña presenta las etiquetas definidas por el usuario para cada elemento en particular. Las etiquetas son un mecanismo de almacenaje temporal de datos, que pueden ser numéricos o alfanuméricos.
- d) *General*: Esta pestaña contiene información general del objeto, como su nombre, tipo y conexiones en cada puerto.

- e) **Statistics:** Esta pestaña muestra información estadística que el programa recolecta, en relación con cada objeto, esta información se actualiza de manera dinámica y se puede desplegar mientras el modelo se ejecuta (Masini y Toucet, 2010).



Fuente: Elaboración propia utilizando FLEXSIM 5.

Figura 2.9 Ejemplo de la interfaz gráfica de usuario (GUI) utilizada en FLEXSIM y pestañas de su ventana



Fuente: Elaboración propia utilizando FLEXSIM 5.

Figura 2.10 Ventana de Propiedades de los elementos utilizados para el modelaje de sistemas en FLEXSIM

Con base en el modelo conceptual establecido en la Figura 2.2, se procedió a desarrollar el modelo en el programa FLEXSIM versión 5. En primer lugar, y debido a su importancia, se presentan a continuación los elementos que fueron utilizados para la elaboración del modelo y algunas de sus características.

SOURCE: Es un elemento fuente, en el cual se generan las aeronaves que operan dentro del sistema modelado, en este elemento fueron capturadas cada una de las funciones de densidad de probabilidad para cada tipo de aeronave y operación. Este elemento es la principal diferencia entre los dos submodelos que se realizaron, ya que el primer submodelo, que abarca el horario de las 0 a las 6 horas, sólo tiene dos objetos de este tipo, los cuales son aterrizajes y despegues (Tabla 2.6); mientras que en el submodelo que abarca el horario de las 6 a las 24 horas, tiene 20 diferentes objetos, ya que fue necesario establecer una fuente de generación de aeronaves para cada tipo principal de aeronaves o grupo que opera dentro del AICM, y para cada operación, ya sea despegue o aterrizaje (ver Tablas 2.7 y 2.8).

Una vez asignadas las fdp de despegues y aterrizajes a cada tipo principal de aeronave, este elemento permite cambiar sus propiedades físicas y de visualización, modificando su interfaz gráfica de los objetos que son generados en estas fuentes, ya sea al cargarlos directamente de la biblioteca interna de FLEXSIM, o exportando objetos 3D de una biblioteca externa, provenientes por ejemplo, de programas como son *3D Studio* o *Sketchup*. Para este proyecto, las distintas aeronaves que se visualizan en el modelo fueron cargadas de bibliotecas externas y algunas fueron modificadas con el fin de respetar tamaños, escalas, posiciones y orientaciones, cuando están fluyendo dentro del modelo.

QUEUE: Este elemento es de gran utilidad ya que tiene asignadas dos funciones de suma importancia al modelar. La primera función permite la espera y almacenaje de objetos (aeronaves) que solicitan servicio de operación desde corriente arriba del flujo, mediante un puerto de entrada hacia el siguiente elemento del modelo, al que se dirigen corriente abajo, mediante un puerto de salida. Estas aeronaves permanecen dentro de la cola (QUEUE) hasta que reciben la indicación de poder salir y realizar la operación que se ha solicitado corriente abajo.

Este proceso se realiza en distintas localizaciones dentro del modelo, ya sea en la generación de aeronaves y espera (colas de despegue y aterrizaje) durante la operación en pistas, o en las restricciones en el modelo, por ejemplo, en la que se indica que las aeronaves que se posicionen en las calles de rodaje Eco, Fox y Bravo, no deben dejar su lugar a menos que la pista 05-L no presente servicio en ese momento.

La segunda función asignada a este elemento, es la de distribuir el flujo de objetos con los que está conectada la QUEUE, mediante una puerto de salida a lo largo del modelo. Debido a que en diversas condiciones del modelo se presenta esta situación, al tener que decidir a qué elemento corriente abajo hay que dirigir los

objetos que solicitan servicio en un momento determinado, y se tienen dos o más opciones para ello.

En particular, esta situación se presenta en las colas de despegues y aterrizajes, cuando las aeronaves solicitan servicio para operar dentro de cualquiera de las dos pistas, precisamente esta QUEUE es la encargada de dirigir los objetos mediante un puerto de salida y por medio de la asignación de un determinado porcentaje a cualquiera de las pistas, que estén disponibles, en el momento de la solicitud y respetando siempre el principio de FCFS, el cual se estableció como predeterminado en el programa.

Otro caso, es el que se presenta en la QUEUE que distribuye el flujo de aeronaves cuando éstas realizan su rodaje dentro del aeropuerto y solicitan la asignación de una posición dentro de las plataformas de la terminal a la que se dirigen. La QUEUE respectiva distribuye hacia cada plataforma el flujo de aeronaves mediante un porcentaje, y si la posición a la cual fue asignada se encuentra ocupada, esta indicación es reevaluada y la aeronave es dirigida hacia el primer puerto disponible dentro de la plataforma correspondiente de forma aleatoria.

CONVEYOR: Mediante este elemento se transportan los objetos de un lugar a otro, funciona como un banda transportadora a la cual es posible modificarle parámetros, tanto físicos como de visualización, de esta forma se puede utilizar como una pista o un rodaje del aeropuerto. La flexibilidad de este programa permite manejar diferentes propiedades físicas de este objeto, incluso en distintos tramos del modelo, asignando por ejemplo, distintas velocidades, capacidades máximas, longitud y ancho de sección, entre dos o más objetos consecutivos, además de cambiar su forma de recta a curva y con distintos radios.

Este elemento además de funcionar como un transportador, tiene la funcionalidad de trabajar como almacén de objetos mientras estén esperando realizar alguna tarea solicitada. Éste es el caso por ejemplo, de los CONVEYORS utilizados para modelar los rodajes Eco, Fox y Bravo, para los cuales hay una restricción que establece que las aeronaves ubicadas dentro de dichas calles, no deben dejar su lugar a menos que la pista 05-L no presente servicio en ese momento.

Como se mencionó antes, este elemento permite modelar las pistas, que son precisamente las encargadas de marcar los tiempos y frecuencias de operación para cada aeronave; debido a que están conectadas con el resto del modelo mediante las QUEUE de despegues y aterrizajes, indicándoles cuándo abrir o cerrar sus puertos de salida para cada aeronave que solicite servicio.

Además, las dos pista se encuentran ligadas entre sí, e intercambian información entre ellas, a través de un puerto central, para abrir o cerrar puertos de entrada, con objeto de atender otra restricción del modelo, la cual establece que ambas pistas no deben ofrecer servicio de manera simultánea, sino sólo secuencial.

Por último, también las pistas se encuentran interconectadas con los rodajes Eco, Fox y Bravo, mediante la incorporación de este arreglo se logra que el sistema opere armónicamente, se atiendan todas las solicitudes de servicio y se cumple con las restricciones planteadas en el modelo conceptual.

Estos disparadores son básicos y de suma importancia en la modelación ya que son los encargados de realizar la coordinación de tiempo y frecuencia del movimiento de los objetos dentro del modelo. Su aplicación depende de tres variables que fueron consideradas durante la elaboración del modelo. Éstas son: el estado del sistema en un tiempo (t); el tipo de conexión al puerto de origen o destino; y la instrucción establecida, por ejemplo, abrir o cerrar un puerto, mandar un mensaje de retraso o reiniciar una función. Lo anterior remarca la importancia de estos elementos dentro del modelo y explica porqué se debe tener especial cuidado en su configuración.

PROCESSOR: Este elemento fue utilizado para simular las posiciones de atraque de las plataformas de las Terminales 1 y 2 del AICM, debido a que posee ciertas características deseables y necesarias en dicha función. Una de estas características y la más importante, es el tiempo de procesamiento de un objeto dentro de este elemento.

Este tiempo de procesamiento se refiere al tiempo que se requiere para realizar una tarea específica, por ejemplo, el tiempo que tarda una aeronave en realizar el desembarque de pasajeros, o el tiempo requerido para subir la carga y el equipaje al avión, o el tiempo necesario para el embarque de los pasajeros. En la Figura 2.11 se muestran algunos de los elementos del programa FLEXSIM, utilizados para el modelaje del AICM.

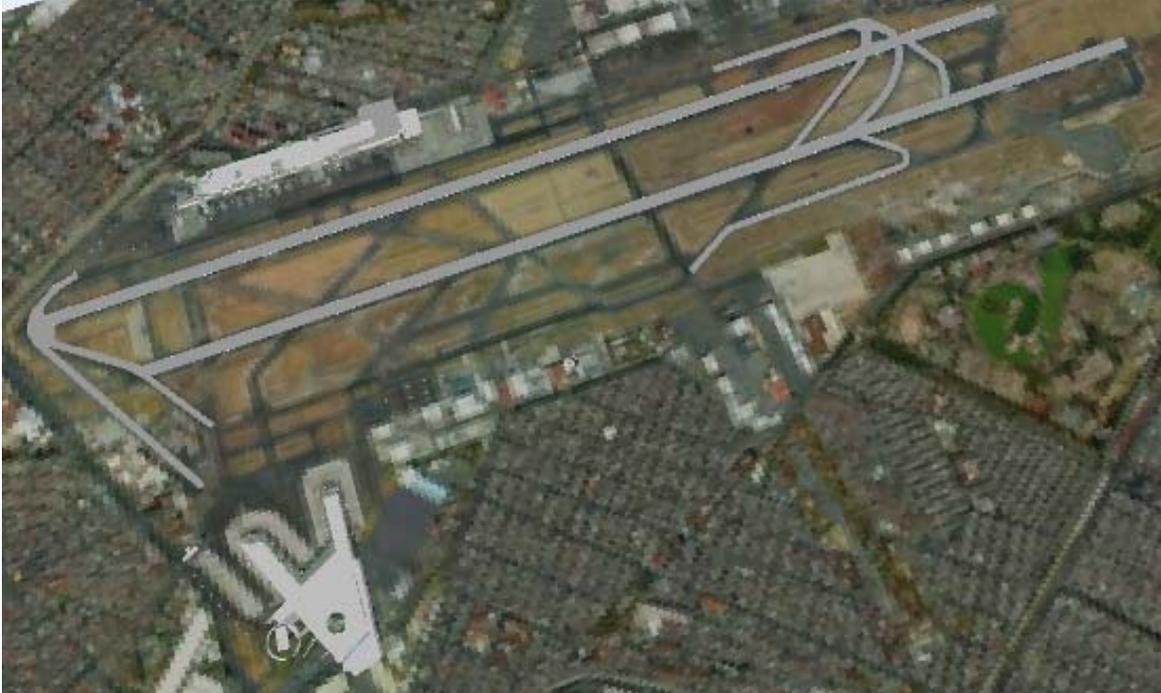
Como ya se había mencionado antes, las plataformas fueron separadas por zonas comunes, por lo cual, los tiempos de procesamiento de cada zona son diferentes. En la Tabla 2.9 se detalla esta información para las distintas plataformas y posiciones de atraque, también se señalan los tiempos de ocupación promedio de las aeronaves en cada una de ellas.

Tabla 2.9 Ocupación promedio por aeronave en las diferentes zonas de las plataformas de la Terminal 1 y Terminal 2 del AICM

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

Fuente: Elaboración propia, con datos de SCT, 2011.

En la Figura 2.12 se presenta una vista en planta del modelo del AICM, en donde se han insertado, mediante *visualtools*, una imagen satelital del aeropuerto en un plano, y las dos terminales en 3D.



Fuente: Elaboración propia utilizando FLEXSIM 5.

Figura 2.12 Vista en planta del modelo de simulación del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México

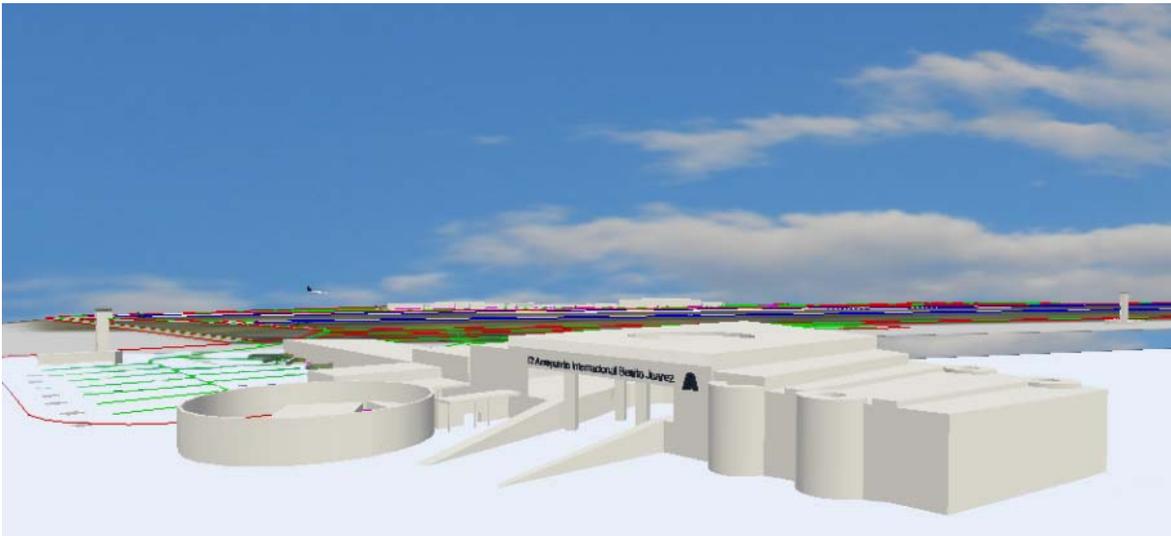
NETWORK NODE: Éste es un elemento de bastante utilidad en la elaboración del modelo de simulación, ya que permite el trazo de una red de caminos, por la que circulan los objetos (aeronaves). Estos caminos pueden ser modificados mediante puntos de inflexión, con objeto de incorporar curvaturas a las trayectorias.

Esta red de caminos contiene ciertas propiedades, las cuales pueden configurarse entre nodo y nodo. Las opciones de configuración están dadas por parámetros específicos, como son: límite de velocidad, aceleración, desaceleración y espaciado entre objetos.

Esta configuración es de suma importancia debido a que mediante una red de caminos se simula el movimiento de las aeronaves en las calles de rodaje y en las plataformas.

Debe tenerse presente que en dichos trayectos existen restricciones de velocidad, por lo que los factores de aceleración y desaceleración juegan un papel muy importante.

En la Figura 2.13 se observa la Terminal 2 del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, en el modelo de simulación, así como distintos elementos utilizados en dicha elaboración, como lo son: PROCESSOR, utilizados como posiciones de atraque en las distintas plataformas, NETWORK NODE, utilizado en el trazo de las redes de caminos dentro de la plataforma, y el VISUALTOOL, utilizado en la inserción de formas 3D, como lo son la terminal y la torre de control.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2.13 Vista de la Terminal 2 del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México en el modelo de simulación

Por otro lado, la magnitud de las distintas velocidades ocupadas en los diferentes trayectos de las aeronaves, juegan un papel importante y fundamental, ya que éstas permiten modificar la rapidez con la que las aeronaves realizan los despegues, aterrizajes y los movimientos en los rodajes.

La unidad de velocidad utilizada en la elaboración del modelo fue establecida en metros/minuto.

En la Tabla 2.10 se muestran las diferentes velocidades promedio reales en los diferentes espacios a simular, así como las respectivas velocidades utilizadas en el modelo.

Cabe señalar, que estas velocidades son el resultado de promediar las velocidades de los distintos tipos de aeronaves que operan en el AICM. También es importante recordar que se aplicó en el modelo el factor de escala utilizado (1:4).

Tabla 2.10 Velocidades promedio para la elaboración del modelo de simulación del AICM

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

Notas:

1. Se consideraron aceleraciones para los despegues de 4,000 metros/minuto² (equivalente a 1.11 m/s²); y de la misma magnitud, pero de sentido contrario para los aterrizajes. Los valores introducidos en el modelo consideran el factor de escala, por lo que la aceleración utilizada fue de 1,000 metros/minuto² (0.277 m/s²).

2. El punto de rotación, es aquel en donde la aeronave en su carrera de despegue levanta la nariz, poco antes de elevarse sobre la pista.

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

Fuente: Elaboración propia.

2.1.5 Realización de pruebas piloto

Con base en las pruebas piloto se realizaron pequeños ajustes para afinar el modelo de simulación. Además, estas pruebas sirvieron para familiarizar al modelador con los resultados arrojados por las simulaciones y para auxiliar en la validación del modelo.

Por ejemplo, la Figura 2.11 muestra un modelo sencillo que fue utilizado para realizar algunas pruebas piloto mediante las cuales se identificaron los elementos a utilizar y su interconectividad, y también, se determinó la base de la programación para los disparadores de entrada y salida.

Como se mencionó antes, se elaboraron dos submodelos diferentes, debido al comportamiento de las operaciones a lo largo del día, el primer submodelo simula las operaciones existentes entre las 0 y las 6 horas, mientras que el segundo submodelo simula las operaciones realizadas entre las 6 y las 24 horas. Esta situación implica que se tengan que integrar los datos arrojados por los dos submodelos, para así obtener datos que incluyan las operaciones realizadas en un día completo, el cual abarca un periodo de 1,440 minutos. Esta relación de los dos submodelos fue establecida de la siguiente manera.

El primer submodelo, que simula las operaciones en las primeras horas del día fue ejecutado durante un periodo de 360 minutos, lo cual cubre el tiempo de simulación que va de las 0 a las 6 horas.

El segundo submodelo, que simula las operaciones del resto del día, fue ejecutado durante un periodo de 1,080 minutos, lo cual implica la simulación del periodo de las 6 a las 24 horas. Al minuto 00.00 de corrida del segundo submodelo se asignó el minuto 360, ya que éste es el inicio de su periodo de simulación, para así asociarlo a las operaciones realizadas en el periodo de las 6 a las 24 horas.

De esta forma se integraron los dos submodelos para obtener simulaciones con un periodo de 1,440 minutos (24 horas).

2.1.6 Verificación y validación del modelo

En este inciso se realizó la verificación y validación del modelo.

2.1.6.1 Verificación del modelo

En la verificación del modelo se incluyeron los movimientos que se tienen por parte de las aeronaves en la parte aérea del aeropuerto, esta información se obtuvo de SENEAM.

Con base en dicha información se pudo definir la distribución de los movimientos de las aeronaves, dentro de las instalaciones del aeropuerto, así como las restricciones que se tienen en la operación del mismo.

Una vez desarrollado el modelo de simulación y mediante las pruebas piloto fue posible verificar que el modelo opera y reproduce fielmente las características del modelo conceptual.

Las pruebas que se realizaron para la verificación del modelo, y que en todos los casos resultaron satisfactorias, fueron las siguientes:

- Verificación de la restricción número 1 del modelo, la cual señala que las dos pistas del aeropuerto, no pueden prestar servicio en forma simultánea, sólo secuencial.
- Verificación de la distribución porcentual de operación en las dos pistas, ya sea en aterrizajes o en despegues. Estos en promedio tienen la siguiente distribución. Despegues: 90.16% en la pista 05-L y 9.84% en la 05-R; y aterrizajes: 17.68% en la pista 05-L y 82.32% en la 05-R.

- Verificación de la distribución de destinos de las aeronaves hacia las terminales del aeropuerto, la cual es de la siguiente manera: Terminal 1, 53.12%, y Terminal 2, 46.88%.
- Verificación de la utilización de las calles de rodaje, de las aeronaves que tienen como destino la Terminal 1, de acuerdo con los siguientes porcentajes: rodaje ECO 7.08%, rodaje FOX 24.8% y rodaje BRAVO 3.54%.
- Verificación de la restricción número 2 del modelo, la cual señala que las aeronaves que se posicionen en las calles de rodaje ECO, FOX y BRAVO no deben dejar su lugar a menos que la pista 05-L no esté prestando servicio en ese momento.
- Verificación de la restricción número 3 del modelo, la cual señala que La pista 05-R no debe ofrecer servicio cuando las calles de rodaje ECO, FOX y BRAVO se encuentren totalmente ocupadas. La capacidad máxima de cada una de estas calles es de tres aeronaves.
- Verificación de las distribuciones y tiempos de ocupación de las aeronaves en las posiciones de atraque, en las plataformas de las dos terminales del aeropuerto.
- Verificación de la capacidad máxima del conjunto de las dos pistas, la cual es de 61 operaciones por hora. Esto se obtuvo con una velocidad media de operación en las pistas de 920 metros/minuto, considerando la escala en el modelo de 1:4.

2.1.6.2 Validación del modelo

Para la validación del modelo fueron tomados como referencia los parámetros de:

- Operaciones totales diarias, considerando los despegues y aterrizajes de los dos submodelos (de las 0 a las 6 horas y de las 6 a las 24 horas), integrados para obtener resultados que representen un día completo de operación.
- Aterrizajes totales diarios considerando los dos submodelos.
- Despegues totales diarios considerando los dos submodelos.
- Porcentaje de operaciones de los principales tipos de aeronaves que operan diariamente dentro del aeropuerto.

Estos representan los principales parámetros operacionales que servirán como base para el cálculo de las emisiones contaminantes.

2.1.6.3 Estimación del número de réplicas requeridas

Para determinar el número de réplicas (corridas) necesarias para obtener valores confiables de las simulaciones, se utilizó la siguiente relación estadística (CASP, 2005).

$$N \geq (t_{\alpha}/2 \times \delta_x)^2 / w \quad 2.1$$

Donde:

N = Número de réplicas del modelo para un nivel de exactitud

δ_x = Desviación estándar muestral

w = Error entre la media estimada y la media real

t = Valor crítico asociado con la distribución T-STUDENT, para un valor de significancia $\alpha = 0.05$

Para validar el modelo se requirieron 20 corridas, de las cuales fueron obtenidos los valores paramétricos de tendencia central y dispersión, del número de operaciones en todo el periodo de simulación, incluyendo y relacionando los dos submodelos (el primero de 360 minutos y el segundo de 1080 minutos).

2.1.6.4 Resultados de la validación del modelo

A continuación se muestran los resultados de las corridas realizadas para la validación del modelo, en las cuales se observó una relativamente baja desviación estándar (σ), entre los datos obtenidos para las diferentes pruebas realizadas, con respecto a una media (\bar{x}) de cada tipo de operación, tanto en despegues, aterrizajes o en el conjunto de ambos.

Estos datos fueron comparados contra los datos reales que fueron utilizados para la elaboración del modelo de simulación, para tener un punto de comparación entre el sistema real y los resultados de la simulación.

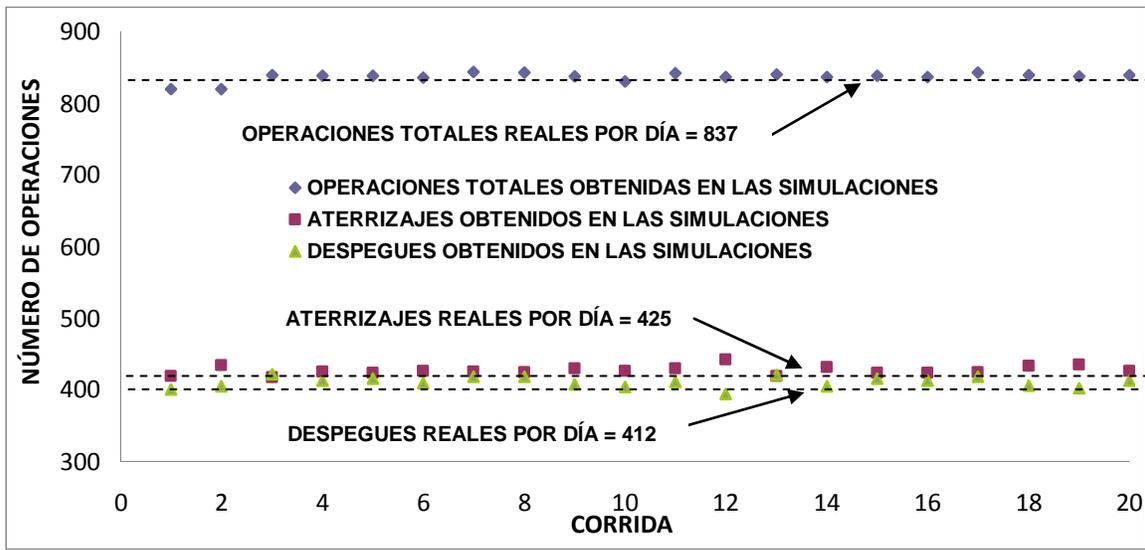
En la Tabla 2.11 se muestra un resumen de resultados obtenidos en la simulación del número de operaciones de aterrizaje, despegue y el total de ambas; además, se presentan los valores de las operaciones del sistema real, con fines comparativos.

Tabla 2.11 Número de operaciones por tipo, obtenidas de la simulación y su comparación con el sistema real

Corrida	Operaciones totales	Aterrizajes	Despegues
1	819	419	400
2	819	434	405
3	839	417	422
4	838	425	413
5	838	423	415
6	835	426	409
7	843	425	418
8	842	424	418
9	837	430	407
10	830	426	404
11	841	430	411
12	836	442	394
13	840	419	421
14	836	431	405
15	838	423	415
16	836	423	413
17	842	424	418
18	839	433	406
19	837	435	402
20	839	426	413
Promedio simulaciones (x)	836.2	426.75	410.45
Desviación estándar (σ)	6.558	6.121	7.480
Operaciones reales	837	425	412
Diferencia entre valor real y simulación	0.8	1.75	1.55
Desviación entre valor real y simulación	0.57	1.24	1.09

Fuente: Elaboración propia.

Al comparar dichos valores se observa que la diferencia entre los valores reales y los obtenidos mediante el modelo, es muy baja, dado que en ningún caso excedió de dos unidades. Esta situación se puede observar gráficamente en la Figura 2.14, la cual muestra el número de operaciones obtenidas durante cada corrida y su desviación con respecto a las operaciones reales. Al analizar los datos obtenidos y observando la poca variabilidad que existe entre los datos reales y los obtenidos en las simulaciones, es posible decir que en cuanto al número de operaciones, el modelo representa adecuadamente al sistema real.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2.14 Número de operaciones obtenidas durante cada corrida y su comparación con las operaciones reales

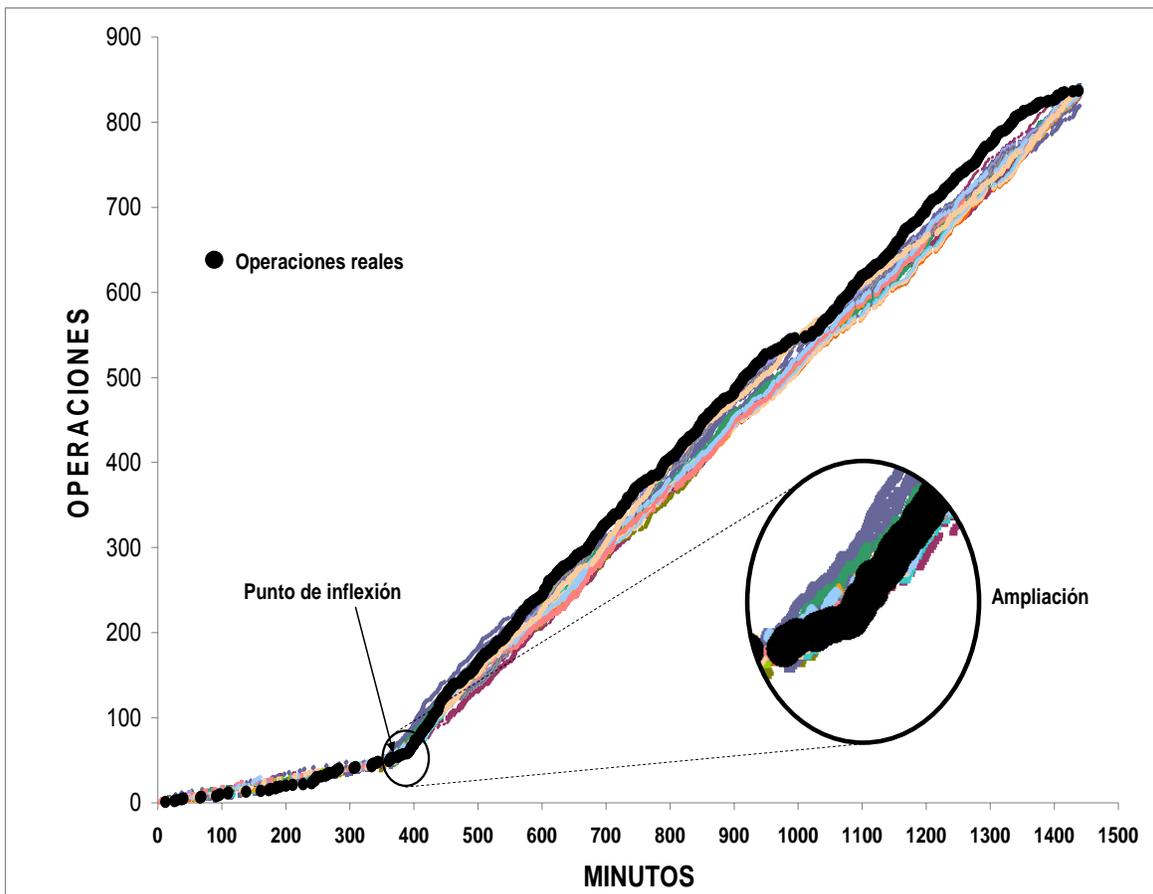
Una vez validado el modelo en cuanto al número de operaciones que genera, es necesario observar la frecuencia con la que ocurren éstas a lo largo del día y los periodos de tiempo de ejecución de las tareas por aeronave, para validar de esta forma las tasas de llegada y salida de cada tipo de aeronave. La validación de estos procesos y tiempos fue realizada mediante un método empírico, el cual consistió en graficar cada operación que se realiza en las pistas del modelo, justo en el instante en que cualquier aeronave comienza a hacer uso de éstas, ya sea para despegar o aterrizar, y a cada una se le asignó un número consecutivo de operación (1, 2, 3, ..., n). Este mismo criterio y procedimiento fue aplicado al sistema real.

Al graficar la información obtenida anteriormente, se observó cómo es el comportamiento de las operaciones a lo largo del día, tanto de los valores obtenidos mediante el modelo de simulación, como el de los valores reales. En las Figuras 2.15, 2.16 y 2.17 se pueden observar las operaciones acumuladas a lo largo del día, de las 20 corridas que fueron utilizadas en la validación del sistema; así como el punto de inflexión, en el cual la pendiente de las tendencias de las operaciones aumenta. Este punto de inflexión se presenta en el minuto 360, que es cuando se incrementa la actividad en forma considerable y es el punto en donde se une el submodelo 1 con el submodelo 2. En cada una de estas figuras se insertó una ampliación, en la cual se observa con más detalle la distribución y tendencia de las operaciones respecto al tiempo y, también, cómo se comportan las operaciones obtenidas mediante el modelo de simulación con respecto al sistema real.

Observando el comportamiento de cada tipo de operación (despegue o aterrizaje) y el conjunto de estas operaciones, se puede concluir que a pesar de la variación que existe entre los datos obtenidos mediante los submodelos de simulación con respecto a los datos del sistema real, estos submodelos estiman datos válidos, con una dispersión aceptable.

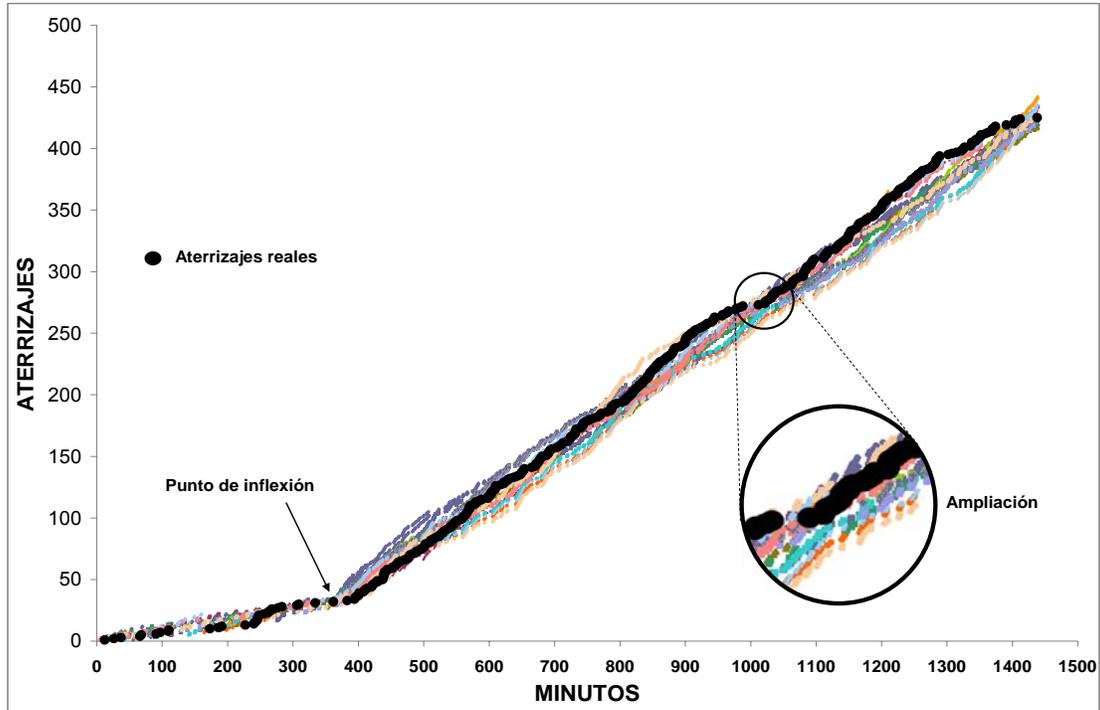
Esta dispersión se presenta debido a las distintas instrucciones y probabilidades que maneja el modelo. Por ejemplo, una de estas instrucciones es la probabilidad de ocupación de cualquier calle de salida rápida ECO, FOX o BRAVO, ya que éstas pueden hacer que una aeronave desaloje más rápido la pista y permitir otra operación en un periodo de tiempo menor.

Cada una de estas probabilidades y opciones operativas influyen directamente en la frecuencia y número de operaciones que se realizan en los submodelos.



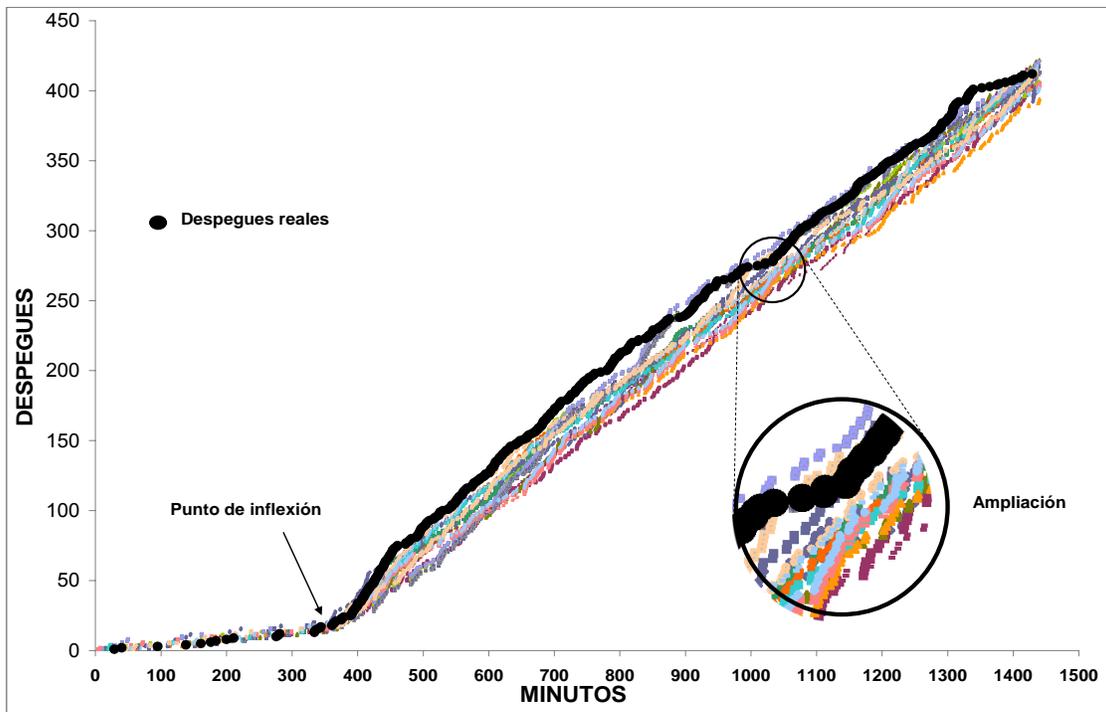
Fuente: Elaboración propia.

Figura 2.15 Acumulación y frecuencia total de operaciones (aterrizajes y despegues) en el modelo de simulación y el sistema real



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2.16 Acumulación y frecuencia de aterrizajes en el modelo de simulación y el sistema real



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2.17 Acumulación y frecuencia de despegues en el modelo de simulación y el sistema real

Continuando con la validación del modelo, es necesario obtener un mayor detalle en relación con el número de operaciones realizadas por tipo principal de aeronave que opera en el AICM, es decir, cuántas operaciones realiza cada uno de los diez principales tipos utilizados en el modelo, para compararlos con los que operan en la realidad.

Debido a la reducida actividad que hay en el intervalo entre las 0 y 6 horas, para el primer submodelo no se tienen fuentes que generen un determinado tipo de aeronave, sino sólo dos fuentes, una para aterrizajes y otra para despegues. Por lo anterior, para asignarle a cada operación generada en el modelo de simulación un tipo de aeronave, primero se obtuvo el número de aterrizajes y despegues estimados por el modelo de simulación y después se listaron los del sistema real; posteriormente, se ordenaron en forma consecutiva según fueron ocurriendo las operaciones y se relacionó el primer aterrizaje del modelo de simulación, con el primer aterrizaje real, y se le asignó el tipo de aeronave que realizó dicha operación en el sistema real, y así sucesivamente, con cada una de las operaciones.

En el caso de los despegues se procedió de forma similar, hasta completar todas las operaciones. Cuando se presentó la condición de que el número de operaciones estimado por las simulaciones fue mayor al valor real, se procedió a reiniciar después de la última aeronave del sistema real, con la primera aeronave asignada. En la Tabla 2.12 se muestra el orden de las operaciones de aterrizaje y despegue reales, y el tipo de aeronave que las realizó, las cuales fueron asignadas a las operaciones del modelo de simulación.

Una vez asignados los distintos tipos de aeronaves a los datos estimados por el primer submodelo, se prosiguió a agrupar las aeronaves y a obtener el valor total para cada tipo principal de aeronave del modelo de simulación, así como de los valores reales. De esta manera fue posible obtener otro parámetro de comparación para la validación del modelo de simulación. En la Tabla 2.13 se presenta un resumen del promedio de operaciones por tipo de aeronave, para 20 corridas realizadas con el modelo de simulación, las cuales fueron comparadas con cada tipo principal de aeronave que opera en el sistema real; también, se presentan los valores porcentuales de dichas operaciones. Con base en esta comparación se estimaron los parámetros de dispersión, que ayudaron a validar el modelo de simulación.

Como se observa, existe poca variabilidad de los datos estimados mediante el modelo de simulación, en comparación con los datos reales, ya que el mayor porcentaje de variación encontrado fue de 1.31%, para la aeronave Boeing 737. El número total de operaciones diarias estimadas mediante el modelo de simulación, es exactamente igual al obtenido en la operación real del AICM (837 operaciones).

Con base en los resultados de cada una de las pruebas de validación realizadas anteriormente, se puede concluir que el modelo de simulación elaborado

representa adecuadamente al sistema real bajo estudio, por lo que las estimaciones que se obtengan con él, tendrán un adecuado grado de exactitud.

Tabla 2.12 Tipos de aeronaves y operaciones realizadas en un día típico del AICM para el periodo de las 0 a las 6 horas

Aterrizajes antes de las 06:00 horas		Despegues antes de las 06:00 horas	
No.	Tipo de aeronave	No.	Tipo de aeronave
1	Swearingen SA-226TB	1	Airbus 320
2	Boeing 737	2	Boeing 737
3	Boeing 777-200	3	Boeing 737
4	Swearingen SA-226TB	4	Boeing 737-800
5	IL-18	5	North American NA-265 Sabreliner 40
6	Airbus 319	6	Swearingen SA-226TB
7	Airbus 319	7	Learjet 24
8	CASA/IPTN CN-235	8	Boeing 737
9	Boeing 737	9	IL-18
10	Bombardier CRJ100	10	Swearingen SA-226TB
11	Fairchild-Dornier 328JET	11	Swearingen SA-226TB
12	Boeing 767-200	12	Swearingen SA-226TB
13	Boeing 737	13	Airbus 319
14	Airbus 319	14	Boeing 767-200
15	Boeing 737	15	North American NA-265 Sabreliner 40
16	Boeing 737-800	16	Boeing 737
17	Airbus 319	17	Boeing 737
18	Boeing 737		
19	Boeing 737-800		
20	Boeing 737-800		
21	Airbus 319		
22	Swearingen SA-226TB		
23	Boeing 737		
24	Boeing 767-200		
25	Airbus 320		
26	Boeing 767-300		
27	Boeing 777-200		
28	Boeing 737		
29	Airbus 340-300		
30	Boeing 737-800		
31	Boeing 737		

Fuente: Elaboración propia, con base en información de SENEAM.

Tabla 2.13 Número y porcentaje de operaciones por tipo de aeronave, obtenidas de la simulación y su comparación con el sistema real, durante 24 horas de operación

Tipo de aeronave	Operaciones			Operaciones en porcentaje del total (%)		
	Simulación	Reales	Diferencia	Simulación	Reales	Diferencia
Airbus 319	50	46	4	5.974%	5.496%	0.478%
Airbus 320	123	114	9	14.695%	13.620%	1.075%
ATR 42	79	79	0	9.438%	9.438%	0.000%
Boeing 737	185	196	11	22.103%	23.417%	1.314%
Boeing 737-800	73	65	8	8.722%	7.766%	0.956%
Embraer EMB-190	43	47	4	5.137%	5.615%	0.478%
Embraer ERJ-145	166	172	6	19.833%	20.550%	0.717%
Otros	118	118	0	14.098%	14.098%	0.000%
TOTAL	837	837	0	100.000%	100.000%	-----

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados del modelo de simulación e información de SENEAM.

3 Diseño de los experimentos para la estimación de las emisiones bajo distintos escenarios

En este capítulo se planearon los experimentos realizados con el modelo de simulación planteado en el capítulo anterior, además, se efectuaron las corridas necesarias para llevar a cabo dichos experimentos y se obtuvieron los datos de las estimaciones. Se consideraron las condiciones operativas de enero de 2011 y también tres escenarios futuros. En ambos casos se determinaron las emisiones bajo la política actual de atención de aeronaves y al aplicar la nueva estrategia.

3.1 Consideraciones generales

En este capítulo se realizaron tres experimentos, en el primero se estimaron las emisiones de CO₂ generadas en el AICM, bajo las condiciones operativas de enero de 2011, durante las fases de aterrizaje y despegue de las aeronaves, y también durante su rodaje. En el segundo experimento, con base en las emisiones unitarias de CO₂ por tipo de aeronave, los tiempos de operación, y las demoras de las aeronaves en las colas, se aplicó una estrategia que permite reducir las emisiones de gases contaminantes. Por último, en el tercer experimento se estimó y evaluó el efecto del crecimiento de la demanda en las pistas del AICM, considerando tres escenarios futuros; en el primero, se consideró que la ocupación de las pistas llegaría hasta el 80% de su capacidad máxima; en el segundo, que la ocupación de las pistas estaría al 90% de su capacidad máxima; y finalmente, en un tercer escenario se considera que la ocupación de las pistas alcanzaría el 100% de su capacidad máxima. En cada uno de estos tres escenarios fueron estimadas las emisiones de CO₂, bajo la condición de operación actual y, también, nuevamente aplicando la estrategia propuesta, con objeto de estimar la reducción de emisiones en cada uno de los escenarios planteados.

3.2 Estimación de emisiones de CO₂ en el AICM, bajo las condiciones operacionales de enero de 2011

Actualmente, la política operacional para la atención de las aeronaves que solicitan servicio de aterrizaje o despegue en el AICM, es la de *primeras entradas - primeras salidas* (FCFS). Así que las aeronaves sólo pueden realizar esta operación cuando las pistas no están ofreciendo un servicio o después de que las aeronaves que han solicitado previamente un servicio, ya lo han finalizado¹⁴. Esta

¹⁴ El Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, no está autorizado para realizar operaciones simultáneas, debido a la separación de 310 metros entre los ejes de sus dos pistas.

situación ocurre también con las solicitudes para el despegue de aeronaves. Estos dos tipos de operaciones solicitadas están estrechamente relacionados, ya que ambos eventos son directamente dependientes. La situación descrita anteriormente explica la generación de colas de espera, para la realización de operaciones en pista, y son precisamente estas colas un elemento importante en la generación de gases contaminantes en el AICM, ya que en cualquiera de las operaciones señaladas antes, los motores de las aeronaves permanecen encendidos, lo cual genera quema de combustible y, por lo tanto, se generan gases contaminantes. Lo anterior marca el primer punto de la política utilizada para la estimación de emisiones, el cual consiste en que su inicio será considerando el momento en que una aeronave solicita servicio en pista, ya sea para despegar o aterrizar.

Una vez que las aeronaves obtienen permiso para aterrizar, éstas se dirigen a la pista que les fue asignada y realizan esta operación, para posteriormente desalojar la pista por alguno de los rodajes diseñados para ejecutar esta acción y en seguida se dirigen hacia su terminal de destino, ya sea la Terminal 1 ó la Terminal 2, utilizando las calles de rodaje del aeropuerto. Una vez que la aeronave llega a la plataforma de destino en su terminal, ésta se detiene en la posición de atraque asignada y apaga sus motores, para realizar el desembarque de los pasajeros, equipaje y carga. En ese momento se considera que termina el proceso de aterrizaje de la aeronave, y por lo tanto finaliza la emisión de CO₂ de esta aeronave.

En el caso de que una aeronave obtenga el permiso para despegar, ésta es dirigida, desde la cola en que se encuentre, hacia el umbral de la pista que le fue asignada, y en este punto comienza su carrera de despegue, hasta que la aeronave levanta la nariz para comenzar su ascenso inicial. Para fines prácticos y delimitar hasta qué punto termina el proceso de despegue de una aeronave, al modelo de simulación se le agregó un sumidero (*sink*), a una distancia de 900 metros del umbral de la pista, en donde las aeronaves son eliminadas del modelo. Cualquier aeronave que llegue a este punto deja de generar más registros en el modelo de simulación, ya que se considera que ha salido del sistema, por lo tanto, se considera que aquí termina el proceso de despegue de cada aeronave.

Una vez delimitados y definidos los tiempos a considerar para la estimación de la emisión de gases contaminantes, se debe definir el consumo de combustible por unidad de tiempo de los distintos tipos de aeronaves que operan en el AICM.

La determinación del consumo de combustible por tipo de aeronave se fundamentó en la tabla de consumos de combustible por distancia recorrida. Dicha tabla es parte de la calculadora de emisiones, de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), la cual se presenta en el Anexo 1. Esta tabla en su primera columna muestra el código que le asigna la OACI a distintos tipos de aeronaves, este código puede contener equivalencias para distintas aeronaves según la IATA, y estas equivalencias se muestran en el Anexo 2. En la segunda columna se presentan los consumos de combustible para distintos tipos de aeronaves, cuando

recorren una distancia de 231.5 kilómetros, la cual es aproximadamente la distancia en la que se presentan las fases de vuelo críticas respecto al consumo de combustible. Estas fases son: despegue, ascenso inicial, ascenso final, descenso, aproximación inicial, aproximación final y aterrizaje. Éstas son precisamente las fases en las que se estimaron las emisiones de gases contaminantes.

Para obtener los consumos unitarios por unidad de tiempo de cada tipo de aeronave, fue necesario realizar una relación para el consumo de combustible dado por la calculadora de emisiones de la OACI de la siguiente manera.

Se sabe que la velocidad está dada por la relación de distancia por unidad de tiempo:

$$v = \frac{d}{t} \quad 3.1$$

Al despejar el tiempo (t) de la ecuación 3.1 se obtiene la siguiente relación:

$$t = \frac{d}{v} \quad 3.2$$

La distancia (d) es un valor constante que corresponde al valor considerado en la tabla de consumos de combustible de la calculadora de emisiones de la OACI, es decir, 231.5 kilómetros, y la velocidad (v) es la velocidad promedio a la que una aeronave se mueve durante las fases de vuelo señaladas antes.

Con base en la relación 3.2 es posible estimar el tiempo requerido por una aeronave para realizar un vuelo de 231.5 kilómetros, con un consumo específico de combustible. Ahora bien, para obtener el consumo de combustible por unidad de tiempo por tipo de aeronave será utilizada la siguiente relación:

$$C_t = \frac{\text{consumo}_t}{t_t} \quad 3.3$$

Donde:

C_t = Consumo de combustible por unidad de tiempo (consumo unitario), en kilogramos/hora o kilogramos/minuto.

consumo_t = Consumo de combustible por aeronave para un recorrido de 231.5 kilómetros. Obtenido de la tabla de consumos de combustibles por distancia recorrida de la OACI (kilogramos de combustible)

t_t = Tiempo requerido para que una aeronave realice un vuelo de 231.5 kilómetros.

Una vez que se han obtenido los consumos de combustible por unidad de tiempo, se requiere una relación que indique cuanta es la generación de gases contaminantes producidos por la quema del combustible. La Tabla 3.1 muestra un resumen de diferentes calculadoras de emisiones, en la cual se indica la cantidad de gases contaminantes (en kilogramos), generados por la quema de un litro de combustible utilizado por los motores de los diferentes tipos de aeronaves. Simaiakis y Balakrishnan (2010), basan su estimación en el análisis realizado en los cuatro aeropuertos más importantes de Estados Unidos. En este caso, las estimaciones son para el carreteo de las aeronaves antes del despegue.

La OACI basa su cálculo en el peso del combustible y sólo determina la cantidad de CO₂ generado. Cabe señalar que el peso específico (relación peso/volumen) del combustible depende de su temperatura. Para los cálculos realizados en este trabajo, se consideró un peso específico de 0.82 kg/lit, que corresponde a una temperatura de 22° C (Norma Oficial Mexicana NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005). Mediante el peso específico se puede estimar el consumo de combustible en litros para determinar posteriormente, con base en la información de la Tabla 3.1, la cantidad de contaminantes producidos por la quema de un litro de combustible durante las fases de vuelo consideradas en este estudio.

Tabla 3.1 Resumen de los contaminantes generados por la quema del combustible utilizado por los motores de las aeronaves

Fuente	Tipo de combustible	Unidad	Emisiones contaminantes (kg)				
			Dióxido de carbono (CO ₂)	Oxido de azufre (SO _x)	Oxido de nitrógeno (NO _x)	Hidrocarburo (HC)	Monóxido de carbono (CO)
IMP-PEMEX	Gasavión	1 litro	2.536	0.0014	0.0268	S/D	S/D
	Turbosina	1 litro	2.036	0.0011	0.0215	S/D	S/D
TRR	Turbosina	1 litro	S/D	S/D	0.0035	1.51	0.0172
OACI	Turbosina	1 litro	2.5887	S/D	S/D	S/D	S/D
DGAC-SCT	Adopta los datos generados por el IMP-PEMEX						

S/D: Sin datos.

Fuente: Elaboración propia con base en: el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), de Petróleos Mexicanos (PEMEX); la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC); Simaiakis y Balakrishnan, 2010; y la OACI.

La elaboración de éste y de los demás experimentos se fundamentaron en los datos estimados por la OACI, debido a que los estudios realizados por esta organización son considerados en el ámbito mundial. Por otro lado, en los datos presentados en la Tabla 3.1 se observa que los gases de CO₂ representan los mayores valores de emisiones generadas por la quema de turbosina, en comparación con otros tipos de contaminantes, como son el óxido de azufre (SO_x), el óxido de nitrógeno (NO_x) y el monóxido de carbono, los cuales por no ser representativos, no fueron considerados en este estudio.

Siguiendo con el experimento, con base en el modelo de simulación, se estimaron los tiempos particulares de servicio (t_i) para cada operación de las aeronaves, durante los despegues y aterrizajes, considerando un periodo de operación del aeropuerto de 24 horas. Posteriormente, estos tiempos fueron relacionados con el consumo unitario de combustible, por tipo de aeronave (litros/minuto) y de esta forma se obtuvo el consumo total de combustible para cada operación. Una vez obtenido este consumo, se prosiguió a estimar la generación de CO_2 , derivado de la combustión de la turbosina, considerando el tiempo que se requirió en cada operación, mediante la relación de generación de contaminantes establecida por la OACI (Tabla 3.1), la cual es de 2.5887 kilogramos de dióxido de carbono por litro de turbosina quemado.

Siguiendo estos pasos se estimó la cantidad de dióxido de carbono generado por las distintas aeronaves que operan durante un día completo, en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, considerando la demanda de servicio existente en enero de 2011.

3.3 Aplicación de una estrategia en el AICM, para la reducción de las emisiones de CO_2 generadas por las aeronaves, bajo las condiciones operativas de enero de 2011

El objetivo de este experimento fue establecer y evaluar una estrategia de atención de las operaciones aéreas en el AICM para reducir los niveles de emisión de gases contaminantes producidos por la operación de las aeronaves. La regla tradicional para atender las aeronaves, primeras entradas–primeras salidas, fue sustituida por una secuencia que reduce estos niveles de contaminación.

El enfoque utilizado para resolver este problema consiste en un procedimiento que determina el orden de atención, sin enumerar todas las alternativas posibles. Por ello, la solución puede ser obtenida en un tiempo muy reducido.

Una primera aproximación para encontrar la solución óptima del problema consiste en listar todas las alternativas posibles. Este método es confiable, sin embargo, ya que la cantidad de soluciones posibles se incrementa rápidamente de acuerdo con el número de variables, no es factible obtener una solución en un tiempo de cómputo razonable, sobre todo en problemas que consideran un número de variables de tamaño medio o grande (Fernández, 2009). En el caso de una línea de espera con n aeronaves solicitando servicio en la pista de un aeropuerto, existen $n!$ secuencias posibles para atenderlas.

La formulación del problema es como sigue: considere que la pista de un aeropuerto debe atender las solicitudes de servicio de un cierto número de aeronaves $n = \{A, B, C, \dots, N\}$. Cada una de las aeronaves tiene dos características importantes: la emisión unitaria de gases contaminantes por unidad de tiempo (E_i)

y el tiempo particular de servicio de cada operación (t_i), durante los despegues o aterrizajes. El tiempo total de servicio que corresponde a la aeronave n de acuerdo con la secuencia de atención se define como τ_n . Éste representa el intervalo de tiempo entre la solicitud de servicio de la aeronave n y el momento en que éste es completado. Para un grupo de aeronaves esperando servicio, la aeronave n tendrá un tiempo total de servicio igual a:

$$\tau_n = \sum_{i=1}^n t_i \quad 3.4$$

Para un grupo de n aeronaves las emisiones totales (ET) son:

$$ET = E_A(\tau_A) + E_B(\tau_B) + E_C(\tau_C) + \dots + E_N(\tau_n) \quad 3.5$$

Solución exacta para dos aeronaves

En el caso de dos aeronaves en una línea de espera (A y B), hay dos secuencias posibles de atención ($2! = 2$). La primera consiste en atender a la aeronave A y después a la aeronave B ($A \rightarrow B$); la otra posibilidad es atender primero a la aeronave B y después a la aeronave A ($B \rightarrow A$).

Las emisiones de gases contaminantes para estos casos son:

$$E_{A,B} = E_A(\tau_A) + E_B(\tau_B) = E_A(t_A) + E_B(t_A+t_B) = E_{At_A} + E_{Bt_B} + E_{Bt_A} \quad 3.6$$

$$E_{B,A} = E_B(\tau_B) + E_A(\tau_A) = E_B(t_B) + E_A(t_B+t_A) = E_{At_A} + E_{Bt_B} + E_{At_B} \quad 3.7$$

Solución exacta para tres, cuatro y cinco aeronaves

En el caso de tres aeronaves ($n = 3$), hay seis secuencias posibles de atención ($3! = 6$). Aplicando la ecuación 3.5 se pueden estimar las emisiones contaminantes:

$$E_{A,B,C} = E_A(t_A) + E_B(t_A+t_B) + E_C(t_A+t_B+t_C)$$

$$E_{A,C,B} = E_A(t_A) + E_C(t_A+t_C) + E_B(t_A+t_C+t_B)$$

$$E_{B,A,C} = E_B(t_B) + E_A(t_B+t_A) + E_C(t_B+t_A+t_C)$$

$$E_{B,C,A} = E_B(t_B) + E_C(t_B+t_C) + E_A(t_B+t_C+t_A)$$

$$E_{C,A,B} = E_C(t_C) + E_A(t_C+t_A) + E_B(t_C+t_A+t_B)$$

$$E_{C,B,A} = E_C(t_C) + E_B(t_C+t_B) + E_A(t_C+t_B+t_A)$$

En el caso de cuatro aeronaves ($n = 4$) hay 24 secuencias de atención posibles ($4! = 24$). Utilizando la ecuación 3.5 es posible obtener las emisiones contaminantes. A continuación sólo se muestra la primera y última secuencia.

$$E_{A,B,C,D} = E_A(t_A) + E_B(t_A+t_B) + E_C(t_A+t_B+t_C) + E_D(t_A+t_B+t_C+t_D)$$

$$\begin{array}{c}
 \cdot \quad \quad \quad \cdot \quad \quad \quad \cdot \\
 \cdot \quad \quad \quad \cdot \quad \quad \quad \cdot \\
 \cdot \quad \quad \quad \cdot \quad \quad \quad \cdot
 \end{array}$$

$$E_{D,C,B,A} = E_D(t_D) + E_C(t_D+t_C) + E_B(t_D+t_C+t_B) + E_A(t_D+t_C+t_B+t_A)$$

En el caso de cinco aeronaves ($n = 5$) hay 120 secuencias de atención posibles ($5! = 120$). Aplicando nuevamente la ecuación 3.5 se obtienen las emisiones contaminantes. A continuación sólo se listan nuevamente la primera y la última secuencia.

$$E_{A,B,C,D,E} = E_A(t_A) + E_B(t_A+t_B) + E_C(t_A+t_B+t_C) + E_D(t_A+t_B+t_C+t_D) + E_E(t_A+t_B+t_C+t_D+t_E)$$

$$\begin{array}{c}
 \cdot \quad \quad \quad \cdot \quad \quad \quad \cdot \\
 \cdot \quad \quad \quad \cdot \quad \quad \quad \cdot \\
 \cdot \quad \quad \quad \cdot \quad \quad \quad \cdot
 \end{array}$$

$$E_{E,D,C,B,A} = E_E(t_E) + E_D(t_E+t_D) + E_C(t_E+t_D+t_C) + E_B(t_E+t_D+t_C+t_B) + E_A(t_E+t_D+t_C+t_B+t_A)$$

Observe que si hay pocas aeronaves en la línea de espera, es posible resolver el problema utilizando una hoja de cálculo electrónica, sin embargo, mientras más aeronaves se sigan considerando esta tarea es cada vez más difícil. Por ejemplo, en el caso de 10 aeronaves, hay 3,628,800 secuencias posibles; y para 20 aeronaves habrá más de 2 trillones de posibilidades, $20! = 2,432,902,008,176,640,000$.

El enfoque mediante un algoritmo heurístico

Este enfoque se fundamenta en tres principios que fueron establecidos mediante la observación del comportamiento relacionado con las secuencias de las líneas de espera de dos, tres, cuatro y cinco aeronaves. En todos estos casos las ecuaciones indicadas anteriormente fueron aplicadas y los tres principios fueron verificados. Además, los resultados muestran que al aplicar estos principios, no sólo es posible reducir las emisiones generadas por las aeronaves, sino también obtener los valores mínimos, al menos para líneas de espera de entre dos y cinco aeronaves.

Principio uno: Considere un grupo de $n-1$ aeronaves en el cual es conocida la secuencia de atención que genera las emisiones mínimas. Suponga que posteriormente es agregada un n -ésima aeronave; el orden de atención que presenta las emisiones mínimas para este nuevo grupo corresponde a alguna de las n alternativas, en las cuales la aeronave n es colocada al inicio, entre o al final de la secuencia de atención que inicialmente ofrece las emisiones mínimas para las $n-1$ aeronaves. Este principio crea la posibilidad de obtener la secuencia de

atención que ofrece las emisiones mínimas, de una manera rápida y sin la necesidad de enumerar y calcular todas las alternativas.

Principio dos: El orden de atención que genera la emisión máxima es el orden inverso a la secuencia que genera la emisión mínima. Por ejemplo, si la emisión mínima corresponde a la secuencia A, B, C, ...N, entonces el orden inverso de esta secuencia (N..., C, B, A) genera la emisión máxima.

Principio tres: El valor de las emisiones promedio es la media de las emisiones mínima y máxima (Herrera y Moreno, 2011).

Aplicación de la metodología

La metodología señalada antes fue aplicada para estimar los beneficios potenciales de reordenar la secuencia de atención de las aeronaves, durante los despegues y aterrizajes en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México. Los beneficios fueron cuantificados en términos de la reducción de emisiones de gases contaminantes producidos por las aeronaves.

Para lo anterior, las aeronaves fueron separadas en grupos de dos, tres, cuatro, ..., N aeronaves, dependiendo de cuántas fueron las que solicitaron servicio en pista, ya sea para despegue o aterrizaje, en un lapso menor a un minuto, lo que genera colas de espera. Como se mencionó antes, las pistas en su conjunto tienen una capacidad máxima de 61 operaciones/hora, lo que equivale a 1.017 operaciones/minuto, de ahí que se consideró el tiempo menor a un minuto, para no sobrepasar esta capacidad. Ya que el proceso para obtener las diferencias de tiempo entre solicitudes de servicio y formar los grupos mencionados, es una tarea muy laboriosa si se realiza manualmente, fue recomendable apoyarse en herramientas que simplifican dicho trabajo, para lo cual fueron generadas tablas de cálculo en Microsoft Office Excel habilitadas para Macros. Mediante éstos se pudieron realizar de una forma cíclica los procesos señalados antes. Los códigos del lenguaje de programación utilizados en estas hojas de cálculo se encuentran en los Anexos 3 y 4.

Para poder cuantificar los beneficios potenciales de la nueva estrategia que reduce las emisiones de CO₂, es necesario obtener las emisiones que se producen al aplicarla y compararlas contra las que se generan bajo la condición de operación actual, bajo el principio FCFS. La diferencia entre estos valores es la estimación del beneficio potencial.

3.4 Estimación de las emisiones de CO₂ para tres escenarios futuros y su reducción al aplicar una nueva política operacional en el AICM

En este punto se plantearon tres escenarios futuros, en los que el conjunto de las dos pistas opera al 80%, 90% o al 100% de su capacidad máxima. Para cada uno

de estos escenarios fueron estimadas las emisiones de CO₂ y posteriormente fue aplicada la metodología que busca reducir estas emisiones, para cuantificar posteriormente los beneficios de la nueva política.

Para establecer estos escenarios fue necesario obtener las tasas de llegada y de salida de cada uno de los principales tipos de aeronaves, que operan en el AICM. Se supuso que este comportamiento tiene un crecimiento lineal hasta alcanzar las condiciones que se establecen para cada escenario.

En la Tabla 3.2 se presentan las cantidades de operaciones estimadas para diversos valores de capacidad máxima de las pistas. Estos porcentajes fueron determinados con base en un crecimiento lineal de las operaciones del aeropuerto y partiendo de las operaciones que se realizaron a inicios de 2011.

La tabla presenta los dos principales intervalos de actividad del aeropuerto, que corresponden a cada submodelo y los valores respectivos para una operación de 24 horas.

Tabla 3.2 Número de operaciones para diferentes porcentajes de capacidad de operación del conjunto de pistas del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México

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

Fuente: Elaboración propia.

Con base en la cantidad de despegues y aterrizajes requeridos para alcanzar el 100% de la capacidad máxima de operación en las pistas, y considerando los mismos porcentajes de aeronaves que se tenían en enero de 2011, se obtuvo la cantidad de aeronaves requeridas, por tipo, para que las pistas operen al 100% de su capacidad. En la Tabla 3.3 se presentan los porcentajes de operaciones para cada tipo principal de aeronave que operaba en enero de 2011, en el periodo de las 6 a las 24 horas. Estos mismos porcentajes fueron utilizados en la proyección que se hizo para el 100% de capacidad de operación, con objeto de estimar las tasas de llegada y salida, para cada tipo de aeronave.

Se debe recordar que para el periodo de operación entre las 0 y 6 horas, no existe una clasificación por tipo de aeronave, debido a la reducida actividad aérea en dicho intervalo, la única clasificación para este periodo es por tipo de operación, ya sea despegue o aterrizaje.

Tabla 3.3 Operaciones y porcentajes de los principales tipos de aeronaves para el periodo de actividad entre las 6 y 24 horas en el AICM

Tipo de aeronave	Aterrizajes		Despegues	
	Cantidad	Porcentaje (%)	Cantidad	Porcentaje (%)
Airbus 319	19	4.822	21	5.316
Airbus 320	57	14.46	55	13.92
ATR 42	40	10.15	39	9.873
Boeing 737	91	23.09	92	23.29
Boeing 737-800	29	7.360	31	7.848
Embraer EMB-190	24	6.091	23	5.823
Embraer ERJ-145	87	22.08	85	21.51
Diversas de clase pesada	17	4.315	20	5.063
Diversas de clase grande	15	3.807	18	4.557
Diversas de clase pequeña	15	3.807	11	2.785

Fuente: Elaboración propia.

Para obtener las tasas de llegada y salida de los distintos periodos de operación, así como para cada clasificación de aeronave, se proyectó el número necesario de operaciones para que las pistas operen al 100% de su capacidad, y después este número se dividió entre el número de minutos que dura el intervalo de operación respectivo para cada clase.

Para fines del diseño del experimento y por requerimientos de entrada de datos en el modelo de simulación, las unidades utilizadas para estas tasas se establecieron en minutos por operación.

Las tasas de llegada y salida estimadas, en términos estadísticos representan la media de arribos o salidas de aeronaves y no consideran una varianza, debido a que no existen datos para estimarla, por lo que para fines de ingreso de datos en el modelo, esta media fue asociada con una función de densidad de probabilidad de tipo exponencial, con media x y varianza cero. Cabe aclarar que esta media puede ser asociada a cualquier otra función de densidad de probabilidad que tenga como parámetro de tendencia central la media, ya que en ninguna existirá variabilidad y de esta forma puede ser tomada como un valor constante.

En las Tabla 3.4 y 3.5 se presenta un resumen de cada una de estas funciones de densidad de probabilidad, para los dos periodos de operación, así como para cada tipo principal de aeronave que opera en el AICM.

Tabla 3.4 Funciones de densidad de probabilidad que generan un funcionamiento igual al 100% de la capacidad de las pistas para las llegadas en el AICM

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

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.5 Funciones de densidad de probabilidad que generan un funcionamiento igual al 100% de la capacidad de las pistas para las salidas en el AICM

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

Fuente: Elaboración propia.

Con base en las funciones de densidad de probabilidad obtenidas anteriormente, es posible obtener las emisiones de CO₂ cuando se presenta una demanda de

servicio igual al 100% de la capacidad máxima, siguiendo el método planteado en el inciso 3.2.

Para obtener una demanda de servicio igual al 90% y 80% de la capacidad máxima, fue necesario realizar un ajuste al modelo de simulación. Este ajuste consistió en insertar un sumidero (*sink*) que desecha un 10% y un 20% respectivamente, del 100% de aeronaves generadas en la fuente (*source*). Bajo estas consideraciones fue posible estimar las emisiones de CO₂ en cada uno de los escenarios futuros.

Continuando con el diseño del experimento, el siguiente paso fue aplicar la estrategia que reduce las emisiones de CO₂, al cambiar el orden de atención tradicional de las aeronaves. Después, estos datos fueron comparados con las emisiones que se obtendrían con la política de atención actual, las diferencias de estos valores establecen los beneficios potenciales de aplicar la nueva estrategia, en términos de reducción de emisiones de CO₂.

4 Resultados y análisis

4.1 Consideraciones generales

En esta sección se presentan los resultados y el análisis de cada uno de los experimentos que fueron planteados en el capítulo anterior; los cuales se relacionan con los beneficios potenciales de aplicar la nueva estrategia de atención de aeronaves para reducir las emisiones de gases contaminantes, en la condición operacional de enero de 2011 y para el caso de tres escenarios futuros.

4.2 Resultados de la estimación de emisiones de CO₂ en el AICM, bajo las condiciones operacionales de enero de 2011

Para este experimento fueron realizadas 10 corridas con el modelo, cada una representó un periodo de simulación de un día completo. Esto implica que fueron considerados los dos intervalos de operación del aeropuerto y, por lo tanto, los dos submodelos desarrollados, el primero con un intervalo igual a 360 minutos (6 horas) y el segundo con un intervalo de 1080 minutos (las restantes 18 horas).

En cada corrida fueron obtenidos los tiempos de ocupación en cada proceso durante la contabilización de las emisiones. En la Tabla 4.1 se presenta la distribución de los tiempos promedio que requieren las aeronaves en los distintos procesos durante su operación típica. Observe que los procesos en las colas requieren el 37% del tiempo que una aeronave utiliza en realizar su operación, ya sea despegue o aterrizaje, lo que representa más de un tercio del tiempo total. Este es un punto calve, ya que como se mencionó antes, esta situación es una de las causas que incrementa las emisiones de gases contaminantes por las aeronaves.

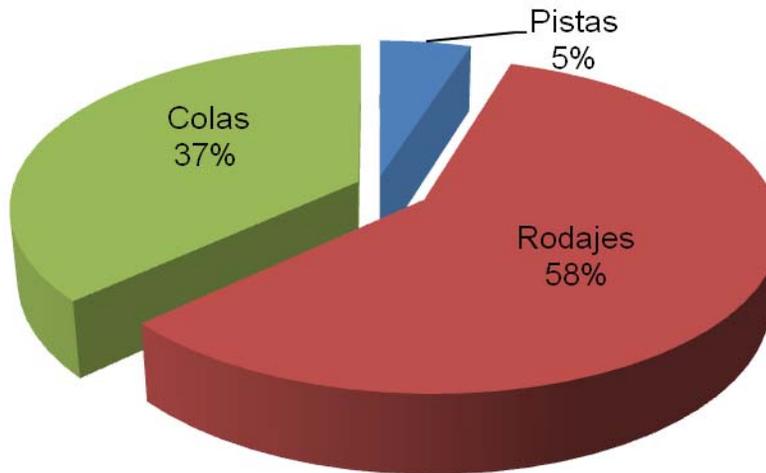
Tabla 4.1 Distribución promedio de los diferentes tiempos que una aeronave requiere en su operación típica de despegue o aterrizaje

Proceso en	Tiempo (minutos)	Tiempo (%)
Pistas	0.42	5
Rodajes	4.95	58
Colas	3.13	37

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4.1 se presenta la distribución gráfica de los tiempos requeridos por una aeronave en su operación típica de despegue o aterrizaje. El mayor tiempo se requiere para el proceso de rodaje de las aeronaves, con el 58% del tiempo total,

posteriormente, se ubica el tiempo consumido por las aeronaves en líneas de espera con un 37% del tiempo total y, finalmente, con un 5% se ubica el tiempo consumido por las aeronaves en las pistas. Como se aprecia, este último es el más reducido. Además, esta operación en las pistas es la que establece la posibilidad de que se realice o no otra operación subsecuente, debido a la restricción que tienen en cuanto a que sólo permiten operaciones secuenciales y no simultáneas.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.1 Distribución promedio de los porcentajes de tiempo que una aeronave requiere en una operación típica de despegue o aterrizaje

Una vez determinadas las distribuciones de los tiempos promedio requeridos para procesar un despegue o aterrizaje, se obtuvo el tiempo promedio para el conjunto de las aeronaves que opera durante un día completo en el AICM. En la Tabla 4.2 se presentan estos tiempos, junto con un resumen de las correspondientes emisiones de CO₂, para cada una de las 10 corridas realizadas.

Las emisiones de CO₂ fueron estimadas al multiplicar los tiempos totales de proceso de cada aeronave¹⁵ por el valor de sus respectivas emisiones unitarias. Con base en el resumen de emisiones presentado en la Tabla 4.2, se obtuvo un valor promedio de 2,762 toneladas diarias de CO₂ generadas por la actividad aérea en el AICM, el cual corresponde a las condiciones operativas de enero de 2011.

Después de haber obtenido la estimación de las emisiones generadas por las aeronaves bajo las condiciones operativas de enero de 2011, se aplicó la nueva

¹⁵ Algunos ejemplos de estos tiempos de proceso se presentan en los Anexos 5 a 12, en donde se muestran estos valores para diversos tipos y clases de aeronaves, así como la asignación de las aeronaves para cada fuente del modelo de simulación.

estrategia, para comparar las emisiones y obtener cuantitativa los beneficios esperados, en términos de la reducción de las mismas.

Tabla 4.2 Tiempo promedio requerido por una aeronave en su operación de despegue o aterrizaje, y emisiones diarias de CO₂

Corrida	Operaciones estimadas	Tiempo promedio de proceso por aeronave (minutos)	Emisiones de CO ₂ (toneladas/día)
1	841	8.17	2,551
2	838	8.77	2,823
3	846	8.37	3,253
4	844	9.08	2,878
5	845	8.41	2,773
6	841	8.28	2,672
7	842	8.32	2,595
8	839	9.07	2,867
9	838	8.42	2,554
10	842	8.15	2,651

Fuente: Elaboración propia.

4.3 Resultados de la aplicación de la estrategia en el AICM para reducir las emisiones de CO₂

El primer paso para estimar las emisiones generadas por las aeronaves en un día completo de operación del AICM, cuando se aplica la nueva estrategia, consiste en determinar y clasificar los grupos de aeronaves que generan colas de espera. Estas colas (grupos de aeronaves) se forman cuando se presentan dos o más solicitudes de servicio en las pistas, durante un intervalo menor a un minuto. Los tamaños de estas colas pueden ser de diversos tamaños, desde dos hasta n aeronaves. Para la clasificación y posterior procesamiento de estos grupos de aeronaves, se elaboró un macro en Microsoft Office Excel con objeto de hacer más rápido su manejo. Los códigos del lenguaje de programación utilizados en este macro se presentan en el Anexo 4. En particular durante la realización de este experimento y en el procesamiento de los datos obtenidos del modelo de simulación se observaron colas máximas de hasta 6 aeronaves.

A cada uno de estos grupos se aplicó el algoritmo propuesto, de acuerdo con el tamaño de la línea de espera. Como se menciona antes, este algoritmo estima las emisiones de CO₂ que se obtienen de las diferentes combinaciones posibles en el orden de atención de las aeronaves. Con base en lo anterior y considerando todas las alternativas posibles para cada grupo de aeronaves, fue seleccionado aquel

valor que generó la menor emisión de CO₂. Este procedimiento fue realizado mediante tablas de cálculo de Microsoft Office Excel, para facilitar su manejo.

En la Figura 4.2 se presenta como ejemplo la pantalla de la tabla de cálculo utilizada para estimar la emisión mínima generada, para diferentes alternativas de secuencias de atención de un grupo de tres aeronaves. Como se observa, el grupo está formado por una aeronave AIRBUS 320, una AIRBUS 300 y una ATR 42, las cuales solicitan servicio en las pistas con ese mismo orden. Los datos necesarios para el cálculo de las emisiones son las emisiones unitarias y los tiempos de proceso de cada aeronave. En la parte derecha de la pantalla se observan los resultados de las emisiones generadas para cada una de las seis alternativas posibles (como el número de aeronaves (n) es igual a 3, las alternativas posibles son n! = 6). También, se observa que el primer resultado se refiere al orden de atención tradicional, es decir a la forma de operación actual del AICM. Esta secuencia está dada por el orden de atención: aeronave 1 → aeronave 2 → aeronave 3. En esa misma columna de resultados se encuentra marcado en rojo, el valor de la secuencia que genera la menor emisión, este orden de atención es: aeronave 2 → aeronave 1 → aeronave 3. Es precisamente esta secuencia la que se toma en cuenta como la adecuada al aplicar la nueva estrategia. Este procedimiento fue seguido en cada grupo de aeronaves que formaron líneas de espera.

AERONAVES DEL GRUPO					Combinación de	Secuencia de
Aeronave 1	AIRBUS 320				emisiones (kg de CO ₂)	atención
Aeronave 2	AIRBUS 300					
Aeronave 3	ATR 42					
	kg de CO ₂ /minuto	Tiempo de proceso aeronave	minutos			
Emisión unitaria aeronave 1 =	309.45734	Tiempo de proceso aeronave 1 =	11.718	Emisión 1 =	17825.711	1→2→3
Emisión unitaria aeronave 2 =	529.55737	Tiempo de proceso aeronave 2 =	12.727	Emisión 2 =	23354.926	1→3→2
Emisión unitaria aeronave 3 =	35.105298	Tiempo de proceso aeronave 3 =	11.285	Emisión 3 =	15558.727	2→1→3
				Emisión 4 =	18639.551	2→3→1
				Emisión 5 =	26435.750	3→1→2
				Emisión 6 =	24168.767	3→2→1
				Emisión mínima =	15558.727	
				Emisión secuencial normal =	17825.711	

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.2 Pantalla de la tabla de cálculo para las emisiones de CO₂ generadas por diferentes combinaciones de secuencia de atención de aeronaves

Posteriormente, a la suma de las emisiones generadas por las líneas de espera obtenidas antes, se sumaron las emisiones de las aeronaves que no formaron colas de espera, de esta forma se obtuvo la estimación total de las emisiones generadas por las aeronaves durante un día completo de operaciones del AICM.

En la Tabla 4.3 se presenta un resumen de las estimaciones obtenidas en este experimento. En las columnas 3 y 4 se tabula el número de aeronaves que por su naturaleza operacional no formaron líneas de espera, así como sus tiempos promedio de procesamiento por aeronave, para cada una de las 10 corridas.

Tabla 4.3 Tamaños de las colas de espera, tiempos promedio de los procesos de las aeronaves en las colas y reducción de las emisiones de CO₂ al aplicar la estrategia propuesta

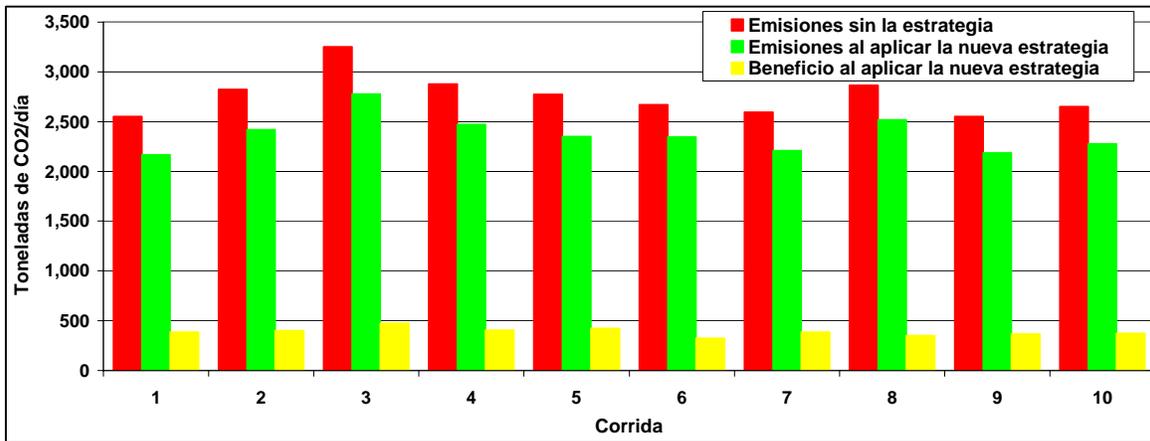
Corrida	Operaciones registradas	Aeronaves sin agrupar		Colas registradas (aeronaves agrupadas)												Emisiones de CO ₂ aplicando la estrategia (toneladas/día)		Reducción de CO ₂	
		Número	TPP ¹	2 Aeronaves		3 Aeronaves		4 Aeronaves		5 Aeronaves		6 Aeronaves		Emisiones de CO ₂ sin aplicar la estrategia (toneladas/día)	(toneladas/día)	Porcentaje (%)			
				Número	TPP ¹	Número	TPP ¹	Número	TPP ¹	Número	TPP ¹	Número	TPP ¹				Número	TPP ¹	
1	841	260	8.52	167	8.08	65	7.86	12	8.15	1	7.23			2,551	2,167	384	15.07		
2	838	253	9.81	146	8.9	71	7.75	15	7.47	4	8.67			2,823	2,420	403	14.27		
3	846	261	9.54	158	7.7	64	8.13	15	7.21	1	8.74	2	9.7	3,253	2,779	475	14.59		
4	844	272	9.95	155	8.86	62	8.61	14	8.18	5	7.78			2,878	2,471	407	14.13		
5	845	250	9.34	165	8.2	61	7.69	13	7.95	6	8.12			2,773	2,349	424	15.29		
6	841	253	9.24	170	7.89	61	7.73	12	7.35	1	7.56	2	11.65	2,672	2,347	325	12.17		
7	842	265	9.29	150	8.19	71	7.59	11	7.47	4	7.18			2,595	2,208	386	14.89		
8	839	247	11.76	164	8.05	61	7.86	16	6.82	2	8.87	1	8.53	2,867	2,516	351	12.24		
9	838	262	9.05	173	8.41	59	7.51	8	7.95	4	8.9			2,554	2,187	367	14.37		
10	842	288	8.8	163	7.82	51	7.56	16	8.34	2	8.67			2,651	2,277	374	14.11		
Promedio	841.60	261.10	9.53	161.10	8.21	62.60	7.83	13.20	7.69	3.00	8.17	1.67	9.96	2,762	2,372	390	14.11		

Nota 1: TPP, es el tiempo promedio de los procesos de las aeronaves, en minutos.

Fuente: Elaboración propia.

En las columnas 5 a 14, de la Tabla 4.3, se presentan los tamaños de las colas estimados por el modelo y sus tiempos promedio de proceso. En la columna 15 se tabularon las magnitudes de las emisiones generadas por las aeronaves, bajo la política operacional actual. En este caso el promedio de las emisiones de CO₂ fue de 2,762 toneladas diarias. En la columna 16 se muestran los resultados de las estimaciones de la generación de CO₂, cuando se aplica la estrategia propuesta. En las columnas 17 y 18 se presentan los beneficios de aplicar la estrategia planteada, tanto en forma absoluta, como relativa. Estos beneficios están establecidos en términos de reducción de emisiones de CO₂. Se observa que al aplicar la estrategia propuesta, se pueden reducir las emisiones hasta en un 14%, lo que se traduce en una reducción del orden de 390 toneladas de CO₂ diarias.

En la Figura 4.3 se presentan gráficamente los resultados obtenidos en cada una de las diez corridas de simulación realizadas. Se pueden comparar las emisiones de CO₂ generadas con la política actual y las que resultan cuando se aplica la nueva estrategia, además se presentan los beneficios obtenidos (reducción de emisiones).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.3 Comparativo de las emisiones de CO₂ considerando la política actual de atención de aeronaves y la estrategia propuesta, bajo las condiciones operacionales de enero de 2011

4.4 Resultados de la estimación de emisiones de CO₂ para tres escenarios futuros y su reducción al aplicar la estrategia propuesta

En este inciso se estimaron las emisiones de CO₂ derivadas del efecto del crecimiento natural de la demanda en las pistas, así como la disminución potencial de emisiones, al aplicar la nueva estrategia de atención de aeronaves.

Para este experimento se consideraron tres escenarios futuros, en cada uno de ellos se supuso que la demanda de servicio alcanza cierto valor, referido a la capacidad máxima de las pistas del AICM. Los porcentajes considerados fueron el 100%, 90% y el 80% de dicha capacidad.

En cada uno de estos escenarios se realizaron dos corridas de simulación, debido a que se observó que no se presentaba una gran variabilidad en los resultados obtenidos. Se debe recordar que en este caso las tasas de llegada y salida, se estimaron con una función exponencial que utilizó sólo los valores de la media y con una varianza igual a cero.

En la Tabla 4.4 se presenta un resumen de los resultados obtenidos en cada una de las pruebas realizadas, para cada escenario planteado. Como se observa, se presentan las estimaciones de las emisiones generadas por las aeronaves operando con el orden de atención tradicional (cuarta columna), así como las que resultan al aplicar la nueva estrategia (quinta columna). Las diferencias de estos valores representan el beneficio potencial de la nueva estrategia, tanto en términos absolutos (sexta columna), como relativos (séptima columna).

Conforme se acerca la demanda de servicio a la capacidad máxima de las pistas, se incrementan las emisiones de CO₂, pero también los beneficios potenciales de la nueva estrategia. Se puede obtener hasta un 19% en la reducción de las emisiones de CO₂ ó 762 toneladas de CO₂ por día, cuando se aplica la nueva estrategia.

Tabla 4.4 Resumen de las emisiones estimadas y de los beneficios potenciales para los diferentes escenarios planteados

Demanda en las pistas en función de su capacidad máxima	Operaciones realizadas	Tiempo promedio de proceso (minutos)	Emisiones de CO ₂ sin aplicar la estrategia (toneladas/día)	Emisiones de CO ₂ aplicando la estrategia (toneladas/día)	Reducción de CO ₂	
					(toneladas/día)	(%)
80%	1,171	7.175	3181	2686	495	16%
90%	1,318	7.185	3606	2985	620	17%
100%	1,464	7.025	4095	3333	762	19%

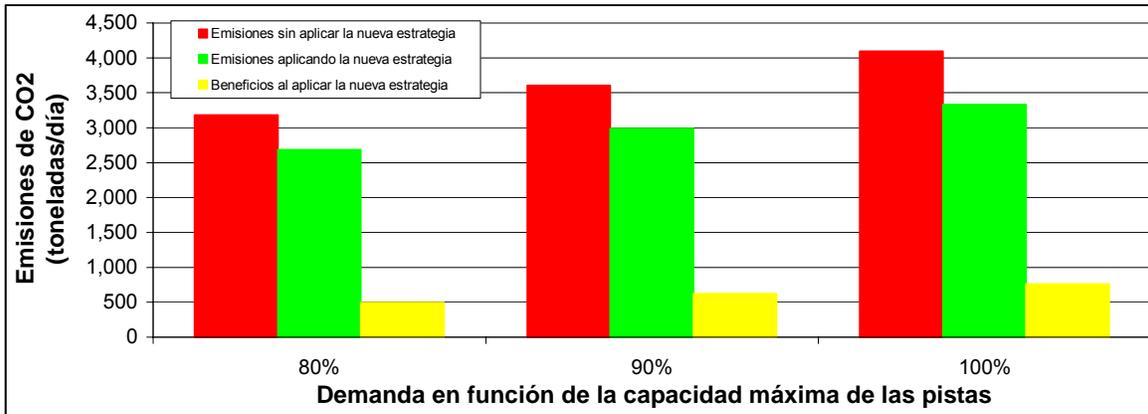
Fuente: Elaboración propia.

Los beneficios de la disminución de emisiones de CO₂, para los tres escenarios considerados, se presentan gráficamente en la Figura 4.4, en donde se representan mediante barras las emisiones estimadas con la política de atención actual, las que resultan al aplicar la nueva estrategia y los beneficios potenciales.

Con base en las emisiones estimadas bajo las condiciones operativas de enero de 2011 y las estimadas para los tres escenarios futuros, se buscó la correlación con el crecimiento de la demanda en las pistas del AICM. La Figura 4.5 muestra dicha correlación, observe que se han incluido las líneas de tendencia que correlacionan exponencialmente los datos graficados. También, note que las emisiones y la demanda tienen una correlación exponencial, con un coeficiente de determinación

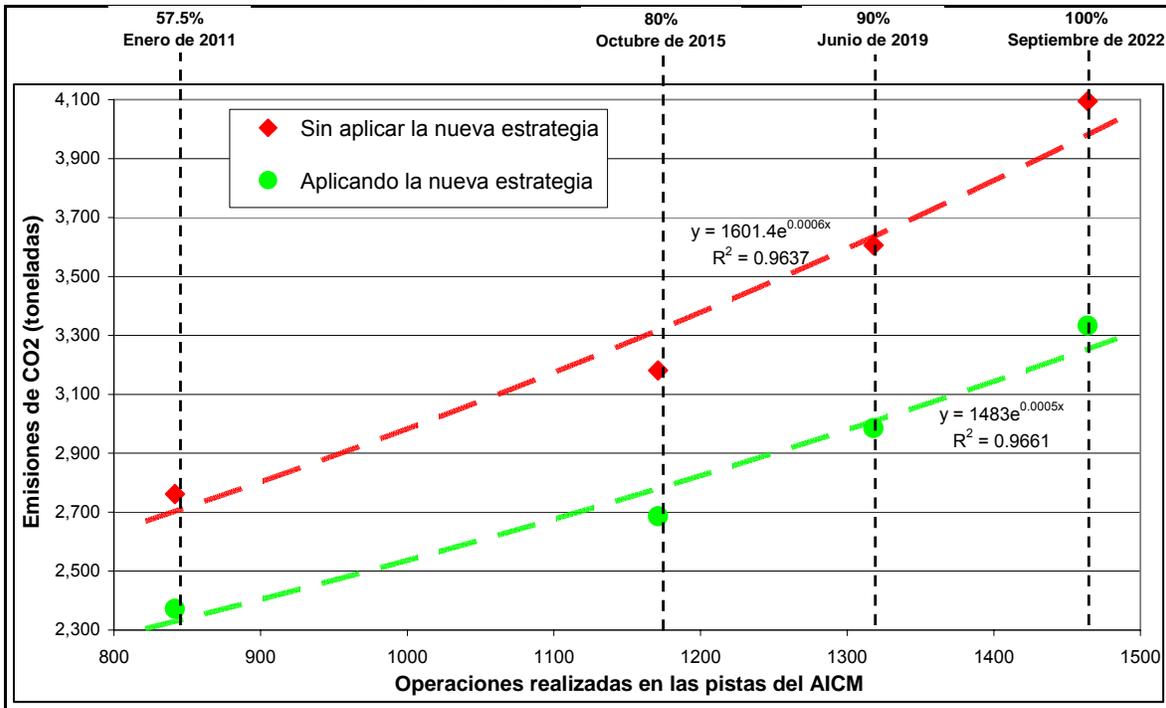
alto. Por esto, se verifica lo establecido en la hipótesis de trabajo: se generan volúmenes de gases contaminantes con una proporción exponencial conforme aumenta la demanda del aeropuerto.

Figura 4.4 Comparativo de las emisiones de CO₂ considerando la política actual de atención de aeronaves y la estrategia propuesta para tres escenarios futuros



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.5 Comportamiento exponencial de la generación de CO₂ conforme se incrementa la demanda



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4.5 también, se indican la fechas estimadas en las que se obtendrán las demandas de 80%, 90% y 100% de la capacidad máxima, considerando un crecimiento moderado de la demanda (Herrera, 2012). De acuerdo con estas estimaciones pronto se alcanzarán valores críticos en la operación del AICM.

Por último, también se observa en la Figura 4.5, que la tendencia de las emisiones generadas con la política actual de atención de aeronaves (línea roja) crece más rápido que la de las emisiones generadas cuando se aplica la nueva estrategia (línea verde). Esta divergencia en las tendencias origina que conforme aumente la demanda de servicio en las pistas, los beneficios también se incrementarán en forma más acelerada.

5 Conclusiones y recomendaciones

Derivado de los resultados obtenidos, se puede afirmar que al aplicar la estrategia propuesta, se obtienen ahorros significativos en la reducción de emisiones de gases contaminantes en el AICM y, además, que se generan volúmenes de gases contaminantes con una proporción exponencial, conforme aumenta la demanda de servicio. Por esto, resulta verdadera la hipótesis de trabajo.

Debido a la reducida actividad aérea en el AICM durante las primeras horas del día, el modelo de simulación desarrollado se subdividió en dos intervalos de operación, el primero entre las 0 y las 6 horas, y el segundo, de las 6 a las 24 horas, que es cuando se da servicio al mayor número de aeronaves. El modelo incluye los distintos movimientos realizados por las aeronaves en el aeropuerto durante su operación de despegue y aterrizaje.

Se observó que durante su operación en el aeropuerto, las aeronaves consumen un tiempo significativo en las líneas de espera. En promedio esto representó el 37% del tiempo total utilizado en cada operación. Por esto, se debe buscar reducir las colas, dado que éstas son un factor importante en la generación de gases contaminantes.

Debido a que se observó una subutilización significativa de las pistas del aeropuerto durante las primeras seis horas del día, es recomendable incentivar el traslado de algunas de las operaciones realizadas durante el periodo de mayor actividad a ese intervalo, así como canalizar la nueva demanda de servicio a ese periodo. Esto podría reducir el número y tamaño de las colas de aeronaves, con lo cual también se reducirían las emisiones de gases contaminantes.

La actividad aérea en el AICM, considerando los despegues, aterrizajes y el movimiento de las aeronaves dentro del aeropuerto, generó en enero de 2011, un promedio de 2,762 toneladas diarias de CO₂. Al aplicar la estrategia propuesta, se estimó que se pueden reducir hasta en un 14% estas emisiones, lo que se traduce en una reducción del orden de 390 toneladas de CO₂ diarias.

También, se observó que conforme se acerca la demanda de servicio a la capacidad máxima de las pistas, se incrementan las emisiones de CO₂, pero también los beneficios potenciales al aplicar la nueva estrategia. Así, para una demanda de servicio igual al 100% de la capacidad máxima de las pistas, se puede obtener hasta un 19% en la reducción de emisiones, lo cual corresponde a 762 toneladas de CO₂ por día.

La aplicación de la estrategia planteada con base en un algoritmo heurístico, puede reducir considerablemente las demoras de las aeronaves en su operación, y también, las emisiones de CO₂, lo cual implica cambiar el orden de atención tradicional de las aeronaves, por aquel que establece la nueva estrategia. Sin embargo, esto requiere el desarrollo e implementación de nuevos procedimientos

de control de tránsito aéreo y, sobre todo, lograr acuerdos con las diversas aerolíneas y usuarios del AICM para aplicar la nueva política. Estos temas pendientes, abren nuevas líneas de investigación para el desarrollo de trabajos futuros.

6 Bibliografía

Airports Council International (ACI). 2012. World Wide Airport Traffic Statistics. January 2012.

Banks Jerry, Carson John S, and Nelson Barry L. 1996. Discrete-Event System Simulation, 2nd ed., Prentice-Hall. USA.

CASP. 2005. Universidad del Bío-Bío. Simulación de procesos de embarque y desembarque en el aeropuerto de Santiago de Chile. Febrero de 2005.

Federal Aviation Administration (FAA). 2010. Air Traffic Control. JO 7110.65T. U.S. Department of Transportation. Effective Date: February 11, 2010. USA.

Fernández Candás, R. 2009. Optimización de la asignación de aeronaves a puertas de embarque en aeropuertos considerando el tiempo de rodadura. Universidad Politécnica de Cataluña. Abertis. España.

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

Herrera García Alfonso. 2001. Simulación de operaciones aeroportuarias. El caso de despegues y aterrizajes en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México. Publicación Técnica No. 180, Instituto Mexicano del Transporte. México.

Herrera García Alfonso. 2006. Alternativas de solución para problemas de capacidad aeroportuaria. Publicación Técnica No. 284, Instituto Mexicano del Transporte. México.

Herrera García Alfonso. 2011. Estrategia para minimizar los costos de operación de las aeronaves y las demoras de los pasajeros en aeropuertos saturados. Publicación Técnica No. 343, Instituto Mexicano del Transporte. México.

Herrera García Alfonso. 2012. Modelo de simulación de operaciones aéreas en aeropuertos saturados. El caso del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México. Publicación Técnica en edición, Instituto Mexicano del Transporte. México.

Herrera García Alfonso y Moreno Quintero Eric. 2011. Strategy for attending takeoffs and landings to reduce the aircraft operating costs and the passenger delays. European Journal of Transport and Infrastructure Research. Volume 11. Issue 2. April 2011, pp. 219-233. <http://www.ejtir.tbm.tudelft.nl/issues/index.asp>. Holanda.

Masini Javier y Toucet Torné Jorge. 2010. Construcción de un modelo usando FLEXSIM. Presentation Transcrip Slide Share. México.

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

Poder Ejecutivo Federal (PEF). 2009. Comisión Intersecretarial de Cambio Climático. Programa Especial de Cambio Climático 2009-2012. Publicado en el Diario Oficial de la Federación el 28 de agosto de 2009.

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

Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). 2009. Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC). La Aviación Mexicana en Cifras 1989-2008. México.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). 2011. Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC). Publicación de Información Aeronáutica. Febrero de 2011. México.

Servicios a la Navegación en el Espacio Aéreo Mexicano (SENEAM). 2010. Manual de controladores de vuelo.

Simaiakis Ioannis and Balakrishnan Hamsa. 2010. Impact of congestion on taxi times, fuel burn and emissions at major airports. Journal of the Transportation Research Board, No. 2184, pp. 22 a 30. Transportation Research Record. USA.

Sitios de Internet

Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM): <http://www.aicm.com.mx>

Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA): <http://www.asa.gob.mx/wb/webasa/asa>

Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC): <http://www.sct.gob.mx/transporte-y-medicina-preventiva/aeronautica-civil/>

Instituto Mexicano del Petróleo (IMP): <http://www.imp.mx/>

Instituto Mexicano del Transporte (IMT): <http://www.imt.mx/>

International Air Transport Association (IATA): <http://www.iata.org/>

International Civil Aviation Organization (ICAO): <http://www.icao.int/>

Secretaría de Energía: <http://www.sener.gob.mx/>

Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT): <http://www.semarnat.gob.mx/>

Transportation Research Information Services: <http://trid.trb.org/>

Anexos

ANEXO 1. Tabla de consumo de combustible por distancia de vuelo (parte 1)

VALORES DADOS EN KILOGRAMOS

Codigo de avion	Distancia de vuelo en (KM)																
	231.50	463.00	926.00	1,389.00	1,852.00	2,778.00	3,704.00	4,630.00	5,556.00	6,482.00	7,408.00	8,334.00	9,260.00	10,186.00	11,112.00	12,038.00	
310	2,810.56	3,893.47	5,990.37	8,091.27	10,172.16	14,532.58	18,991.64	23,699.35	28,675.28	33,763.82							
320	1,644.39	2,497.29	3,680.61	4,705.01	6,027.23	8,332.01	10,885.90	13,441.26									
330	4,093.86	5,862.43	8,616.45	11,369.97	14,215.00	19,790.45	25,634.21	31,744.79	38,043.82	44,311.94	51,005.69						
340	3,832.91	5,693.09	8,462.38	11,310.86	14,201.21	20,133.18	26,278.80	32,695.54	39,114.82	45,872.85	52,895.18	60,079.36	67,669.69	75,888.29	83,891.69		
B11	1,393.95	2,082.41	3,101.00	4,194.78	5,278.46	7,841.61	10,160.03										
146	1,245.09	1,860.63	3,124.95	4,374.54	5,652.57	8,270.11											
727	2,716.78	3,754.67	5,660.16	7,493.22	9,471.16	13,544.24	17,872.26	22,238.06									
732	1,799.99	2,495.27	3,727.09	4,983.72	6,190.73	8,721.79	11,493.03										
734	1,603.13	2,267.36	3,612.83	4,980.32	6,302.56	9,187.67	12,167.63										
747	6,564.83	9,419.78	14,308.04	19,196.29	24,084.95	34,710.53	44,149.98	55,256.17	66,562.31	77,910.24	90,362.10	103,265.90	116,703.31	130,411.02			
744	6,330.86	9,098.26	13,404.56	17,760.86	22,097.16	30,921.57	40,286.67	49,480.22	59,576.88	69,868.28	80,789.24	93,988.50	103,611.40	115,553.02	128,770.81	141,254.25	
767	3,030.31	4,305.22	6,495.18	8,695.13	10,846.09	15,408.59	20,098.57	24,804.39	29,909.40	35,233.06	40,630.93	46,313.67	52,208.00				
757	2,422.90	3,410.18	5,070.35	6,724.43	8,390.71	10,847.75	15,407.03	19,028.69									
777	4,919.58	7,035.14	10,130.36	13,228.45	16,363.80	22,576.41	29,225.68	36,026.67	43,143.25	50,294.63	57,904.29	65,763.50	73,655.15	82,067.40	90,893.23	100,364.32	
DC9	1,743.86	2,477.37	3,816.30	5,067.12	6,498.97	9,354.91	12,395.90										
D10	4,727.67	6,804.37	10,497.46	14,710.55	17,853.63	25,476.23	33,248.68	41,492.33	50,361.04	59,452.39	69,037.90	79,034.06	89,397.99				
F28	1,357.45	1,893.25	2,894.46	3,885.73	5,174.88	7,389.91											
M80	2,102.90	3,110.99	4,563.92	5,910.09	7,463.77	10,523.32	13,799.70										
SVM	147.20	246.10	444.00	641.90	839.80												
SC7	189.00	361.50	706.50	1,048.20	1,385.40												
SH6	285.00	465.30	826.10	1,187.00	1,546.30												
SH3	247.90	408.50	730.00	1,051.60	1,373.40												
SF3	263.60	429.90	767.80	1,073.30	1,447.40	2,100.60											
S20	476.10	814.10	1,450.10	2,168.20	2,842.30	4,094.50											

Fuente: <http://www2.icao.int/en/carbonoffset/pages/default.aspx>.

ANEXO 1. Tabla de consumo de combustible por distancia de vuelo (parte 2)

VALORES DADOS EN KILOGRAMOS

Codigo de aerolinea	Distancia de vuelo en (K.M)															
	231.50	463.00	926.00	1,389.00	1,852.00	2,778.00	3,704.00	4,630.00	5,556.00	6,482.00	7,408.00	8,334.00	9,260.00	10,186.00	11,112.00	12,038.00
F406	113.40	186.30	332.10	477.90	623.60	914.40										
LOF	943.70	1598.40	2,907.80	4,217.10	5,526.40	8,144.40	10,761.10	13,375.10	16,382.30	18,570.50	21,061.40					
LDH	1,101.00	1,980.70	3,880.50	5,400.60	7,121.00	10,563.00	14,006.60	17,452.20	20,900.20	24,351.00	27,805.30					
F50	427.80	881.60	1,189.50	1,697.90	2,206.80	3,226.30										
F27	374.60	606.80	1,070.80	1,534.40	1,997.60	2,921.80	3,841.50									
EMB	164.20	273.60	512.10	750.20												
D38	308.10	480.20	824.40	1,168.60	1,512.80	2,201.40										
DHD	100.70	173.40	318.80	464.10	609.40	899.60										
DH7	385.30	629.90	1,119.30	1,608.60	2,097.80	3,075.80										
DH8	625.20	1,006.60	1,783.60	2,632.70	3,295.70	4,821.80	6,346.10									
CNC	82.50	163.90	306.80	449.70	592.60	887.90	1,174.90									
B360	167.00	269.40	474.20	679.20	884.30	1,294.80	1,706.10									
BE20	160.80	241.30	423.00	604.90	787.10	1,162.60										
BES	186.00	296.40	517.40	738.80	960.60	1,406.30	1,856.00									
J41	228.20	396.50	739.00	1,079.60	1,420.30											
J31	174.50	290.30	522.00	754.10	986.50											
AT7	351.60	567.30	998.60	1,423.70	1,880.70	2,721.60	3,581.30	4,438.20								
AT4	333.60	528.90	918.30	1,309.60	1,699.80	2,479.60	3,259.10									
AMS	488.10	818.40	1,479.30	2,140.80	2,803.00	4,130.20	5,461.90									
CR2	683.00	961.20	1,513.60	2,073.80	2,643.10	3,807.00	5,014.90									
CR7	929.00	1,323.60	2,021.70	2,736.50	3,462.70	5,063.00	6,681.90									
CR9	1,022.90	1,444.20	2,206.30	3,007.80	3,824.20	5,465.80	7,201.20									
ERJ	572.66	873.35	1,422.60	1,985.62	2,561.00	3,751.37										
E70	775.24	1,201.12	1,962.02	2,728.27	3,513.90	5,164.07	6,863.00									
E90	959.77	1,486.46	2,429.10	3,373.64	4,328.37	6,340.90	8,438.00									

Fuente: <http://www2.icao.int/en/carbonoffset/pages/default.aspx>.

ANEXO 2. Código de las aeronaves utilizado por la OACI según modelo y equivalencia con los códigos utilizados por la IATA (parte 1)

Aeronave código IATA	Equivalencia código OACI	Aeronave código IATA	Equivalencia código OACI
100	100	735	734
141	146	736	734
142	146	737	732
143	146	738	734
146	146	739	734
310	310	73A	732
313	310	73C	734
318	320	73G	734
319	320	73H	734
320	320	73J	734
321	320	73M	732
32S	320	73Q	734
330	330	73S	732
332	330	73W	734
333	330	741	747
340	340	742	747
342	340	743	747
343	340	744	744
345	340	747	747
346	340	74D	747
380	ND	74E	744
717	100	74L	747
721	727	74M	747
722	727	752	757
727	727	753	757
72A	727	757	757
72M	727	75W	757
72S	727	762	767
732	732	763	767

Fuente: <http://www.icao.int/>

ANEXO 2. Código de las aeronaves utilizado por la OACI según modelo y equivalencia con los códigos utilizados por la IATA (parte 2)

Aeronave código IATA	Equivalencia código OACI	Aeronave código IATA	Equivalencia código OACI
772	777	BEH	BES
773	777	BES	BES
777	777	BET	BE20
77L	777	BH2	ND
77W	777	BNI	ND
A28	AN6	BNT	ND
A40	F50	CNA	ND
AB3	767	CNC	CNC
AB4	767	CR1	CR2
AB6	767	CR2	CR2
ACD	ND	CR7	CR7
AGH	ND	CR9	CR9
AN4	AN6	CRA	CR7
AN6	AN6	CRJ	CR2
AR1	146	CS2	SC7
AR7	146	CS5	DH8
AR8	146	CV5	AN6
ARJ	146	D10	D10
AT3	AT4	D1C	D10
AT4	AT4	D28	SWM
AT5	AT4	D38	D38
AT7	AT7	D93	DC9
ATP	DH8	D95	DC9
ATR	AT4	D9S	DC9
B11	B11	DC9	DC9
B350	B350	DH1	DH8
BE1	BES	DH2	DH8
BE2	ND	DH3	DH8
BE20	BE20	DH4	DH8
BE9	F406	DH7	DH7

Fuente: <http://www.icao.int/>

ANEXO 2. Código de las aeronaves utilizado por la OACI según modelo y equivalencia con los códigos utilizados por la IATA (parte 3)

Aeronave código IATA	Equivalencia código OACI	Aeronave código IATA	Equivalencia código OACI
DHB	CNC	J31	J31
DHC	ND	J32	J31
DHL	DHO	J41	J41
DHO	DHO	JST	J31
DHP	ND	L10	D10
DHS	ND	L11	D10
DHT	SC7	L15	D10
E70	CR9	L4T	EMB
E75	CR9	LOF	LOF
E90	100	LOH	LOH
E95	100	M11	D10
EM2	J41	M80	M80
EMB	EMB	M81	M80
EMJ	CR9	M82	M80
ER3	CR2	M83	M80
ER4	CR2	M87	M80
ERD	CR2	M88	M80
ERJ	CR2	M90	M80
F24	B11	ND	ND
F27	F27	ND2	SH3
F28	F28	NDE	ND
F406	F406	PA2	ND
F50	F50	PAG	ND
F70	CR9	PL2	DHO
FK7	F27	PN6	BE20
FRJ	CR2	S20	S20
GRS	SWM	S61	ND
HS7	F27	S76	ND
I14	S20	SC7	SC7
IL8	LOF	SF3	SF3

Fuente: <http://www.icao.int/>

ANEXO 2. Código de las aeronaves utilizado por la OACI según modelo y equivalencia con los códigos utilizados por la IATA (parte 4)

Aeronave código IATA	Equivalencia código OACI
SH6	SH6
SWM	SWM
T20	757
TU3	F28
TU5	727
YK2	DC9
YK4	CR9
YN2	SC7
YN7	AN6
YS1	AN6
BEC	ND
734	734
DH8	DH8
764	767
ILW	747
767	767
SH3	SH3
733	734

Fuente: <http://www.icao.int/>

ANEXO 3 Código del lenguaje de programación utilizado en la obtención de los tiempos de procesamiento para cada aeronave, en Microsoft Office Excel

```
Sub TIEMPO_DE_PROCESADO()
Dim AVION As Integer
Dim Tiempo As Double
Dim Tiempo_sig As Double
Dim tiempo_menor As Double
Dim tiempo_mayor As Double
Dim renglon As Integer
Dim i As Integer
Dim asignacion_mayor As String
renglon = 2
i = 2
Do While Sheets("DATOS").Cells(renglon, 2) <> ""
AVION = Sheets("DATOS").Cells(renglon, 1)
tiempo_menor = Sheets("DATOS").Cells(renglon, 2)
asignacion_menor = Sheets("DATOS").Cells(renglon, 4)
tiempo_mayor = Sheets("DATOS").Cells(renglon, 2)
asignacion_mayor = Sheets("DATOS").Cells(renglon, 4)
Do While Sheets("DATOS").Cells(renglon + 1, 1) = AVION
If Sheets("DATOS").Cells(renglon + 1, 2) < tiempo_menor Then
tiempo_menor = Sheets("DATOS").Cells(renglon + 1, 2)
asignacion_menor = Sheets("DATOS").Cells(renglon + 1, 4)
End If
If Sheets("DATOS").Cells(renglon + 1, 2) >= tiempo_mayor Then
tiempo_mayor = Sheets("DATOS").Cells(renglon + 1, 2)
asignacion_mayor = Sheets("DATOS").Cells(renglon + 1, 4)
End If
renglon = renglon + 1 Loop
Sheets("DATOS").Cells(i, 8) = AVION
Sheets("DATOS").Cells(i, 9) = tiempo_menor
Sheets("DATOS").Cells(i, 10) = tiempo_mayor
Sheets("DATOS").Cells(i, 11) = tiempo_mayor - tiempo_menor
Sheets("DATOS").Cells(i, 12) = asignacion_menor
If asignacion_mayor = "/AJUSTE ATERRIZAJES" Then
Sheets("DATOS").Cells(i, 13) = asignacion_mayor
End If
If asignacion_mayor = "/AJUSTE DESPEGUE " Then
Sheets("DATOS").Cells(i, 13) = asignacion_mayor
End If
renglon = renglon + 1
i = i + 1 Loop End Sub
```

ANEXO 4 Código del lenguaje de programación utilizado en la selección de grupos de aeronaves que forman colas de espera, en Microsoft Office Excel

```
Sub asdf()  
b = 2  
i = 3  
grupo = 0  
datosparaalmacenar = 0  
Do While Sheets("ejemplo").Cells(i, 1) <> ""  
dif = 0  
datosparaalmacenar = 0  
    Do While Sheets("ejemplo").Cells(i, 6) = 1  
        dif = dif + Sheets("ejemplo").Cells(i, 1) - Sheets("ejemplo").Cells(i - 1, 1)  
        datosparaalmacenar = datosparaalmacenar + 1  
        If dif >= 1 Then  
            datosparaalmacenar = datosparaalmacenar - 1  
            Exit Do  
        Else  
            i = i + 1  
        End If  
    Loop  
    'almacenar  
    If datosparaalmacenar > 0 Then  
        grupo = grupo + 1  
        For almacenar = 1 To datosparaalmacenar + 1  
            Sheets("ejemplo").Cells(b, 14) = Sheets("ejemplo").Cells(i - (2 +  
datosparaalmacenar) + almacenar, 1)  
            Sheets("ejemplo").Cells(b, 15) = Sheets("ejemplo").Cells(i - (2 +  
datosparaalmacenar) + almacenar, 2)  
            Sheets("ejemplo").Cells(b, 16) = Sheets("ejemplo").Cells(i - (2 +  
datosparaalmacenar) + almacenar, 3)  
            Sheets("ejemplo").Cells(b, 17) = Sheets("ejemplo").Cells(i - (2 +  
datosparaalmacenar) + almacenar, 4)  
            Sheets("ejemplo").Cells(b, 18) = Sheets("ejemplo").Cells(i - (2 +  
datosparaalmacenar) + almacenar, 5)  
            Sheets("ejemplo").Cells(b, 19) = Sheets("ejemplo").Cells(i - (2 +  
datosparaalmacenar) + almacenar, 7)  
            Sheets("ejemplo").Cells(b, 20) = grupo  
            b = b + 1  
        Next almacenar  
    End If  
    i = i + 1  
Loop  
End Sub
```

ANEXO 5 Ejemplo de asignación de aeronaves

Resultados obtenidos con el modelo de simulación para aterrizajes en el periodo de las 0 a las 6 horas

No. Aeronave	Tiempos de proceso (TP) en minutos			Fuente en simulador	Aeronave asignada
	Inicio	Término	TP		
1	27.18	37.37	10.19	ATERRIZAJES	SWEARINGEN SA-226TB
2	28.49	39.51	11.02	ATERRIZAJES	BOEING 737
4	84.74	97.89	13.15	ATERRIZAJES	BOEING 777-200
5	88.38	96.00	7.63	ATERRIZAJES	SWEARINGEN SA-226TB
7	102.12	121.59	19.46	ATERRIZAJES	IL-18
8	112.90	123.59	10.68	ATERRIZAJES	AIRBUS 319
9	122.78	135.86	13.07	ATERRIZAJES	AIRBUS 319
10	127.01	138.00	10.99	ATERRIZAJES	CASA/IPTN CN-235
11	128.70	165.16	36.46	ATERRIZAJES	BOEING 737
14	156.30	168.56	12.26	ATERRIZAJES	Bombardier CRJ100
15	173.09	193.41	20.31	ATERRIZAJES	Fairchild-Dornier 328JET
17	183.17	195.41	12.24	ATERRIZAJES	BOEING 767-200
19	187.58	199.21	11.63	ATERRIZAJES	BOEING 737
20	190.33	200.95	10.62	ATERRIZAJES	AIRBUS 319
21	209.81	247.25	37.44	ATERRIZAJES	BOEING 737
25	237.82	248.70	10.88	ATERRIZAJES	BOEING 737-800
26	240.61	286.65	46.04	ATERRIZAJES	AIRBUS 319
35	275.53	283.13	7.61	ATERRIZAJES	BOEING 737
36	277.21	287.20	9.99	ATERRIZAJES	BOEING 737-800
37	278.44	290.05	11.60	ATERRIZAJES	BOEING 737-800
38	281.05	294.33	13.28	ATERRIZAJES	AIRBUS 319
39	284.70	294.46	9.76	ATERRIZAJES	SWEARINGEN SA-226TB
40	302.09	315.10	13.01	ATERRIZAJES	BOEING 737
41	303.72	313.58	9.86	ATERRIZAJES	BOEING 767-200
42	305.44	315.76	10.33	ATERRIZAJES	AIRBUS 320
43	306.39	317.36	10.97	ATERRIZAJES	BOEING 767-300
44	307.64	322.09	14.44	ATERRIZAJES	BOEING 777-200
45	310.81	320.55	9.73	ATERRIZAJES	BOEING 737
46	312.02	343.93	31.91	ATERRIZAJES	AIRBUS 340-300
50	337.50	352.14	14.64	ATERRIZAJES	BOEING 737-800
51	338.82	348.81	9.99	ATERRIZAJES	BOEING 737
52	341.84	350.69	8.84	ATERRIZAJES	SWEARINGEN SA-226TB
53	349.16	354.46	5.30	ATERRIZAJES	BOEING 737
54	352.56	355.47	2.91	ATERRIZAJES	BOEING 777-200

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO 6 Ejemplo de asignación de aeronaves

Resultados obtenidos con el modelo de simulación para despegues en el periodo de las 0 a las 6 horas

No. Aeronave	Tiempos de proceso (TP) en minutos			Fuente en simulador	Aeronave asignada
	Inicio	Término	TP		
3	55.67	92.83	37.17	DESPEGUES	AIRBUS 320
6	90.34	93.28	2.94	DESPEGUES	BOEING 737
12	148.89	153.85	4.96	DESPEGUES	BOEING 737
13	151.35	154.82	3.47	DESPEGUES	BOEING 737-800
16	182.65	187.33	4.69	DESPEGUES	NORTH AMERICAN NA-265 SABRELINER 40
18	184.84	187.78	2.94	DESPEGUES	SWEARINGEN SA-226TB
22	220.72	229.53	8.81	DESPEGUES	LEARJET 24
23	227.04	229.98	2.94	DESPEGUES	BOEING 737
24	232.04	245.71	13.67	DESPEGUES	IL-18
27	243.22	246.15	2.94	DESPEGUES	SWEARINGEN SA-226TB
28	244.61	262.53	17.92	DESPEGUES	SWEARINGEN SA-226TB
29	259.89	263.36	3.47	DESPEGUES	SWEARINGEN SA-226TB
30	262.31	265.89	3.58	DESPEGUES	AIRBUS 319
31	263.40	266.34	2.94	DESPEGUES	BOEING 767-200
32	270.39	273.86	3.47	DESPEGUES	NORTH AMERICAN NA-265 SABRELINER 40
33	271.37	274.83	3.47	DESPEGUES	BOEING 737
34	274.91	324.32	49.40	DESPEGUES	BOEING 737
47	321.83	324.76	2.94	DESPEGUES	AIRBUS 320
48	329.96	334.53	4.58	DESPEGUES	BOEING 737
49	332.04	334.98	2.94	DESPEGUES	BOEING 737

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO 7 Ejemplo de asignación de aeronaves

Resultados obtenidos con el modelo de simulación para aterrizajes de aeronaves de clase pesada en el periodo de las 6 a las 24 horas

No. Aeronave	Tiempos de proceso (TP) en minutos			Fuente en simulador	Aeronave asignada
	Inicio	Término	TP		
117	429.03	440.97	11.94	ATERRIZAJES PESADA	AIRBUS 300
143	463.09	472.46	9.38	ATERRIZAJES PESADA	AIRBUS 300
192	515.28	528.42	13.14	ATERRIZAJES PESADA	AIRBUS 300
376	759.75	773.96	14.21	ATERRIZAJES PESADA	DC-8-72
391	779.62	792.80	13.18	ATERRIZAJES PESADA	BOEING 767-300
397	787.05	797.91	10.86	ATERRIZAJES PESADA	BOEING 767-200
448	852.41	868.11	15.70	ATERRIZAJES PESADA	BOEING 767-300
452	859.40	869.15	9.75	ATERRIZAJES PESADA	BOEING 767-300
562	991.83	1003.48	11.65	ATERRIZAJES PESADA	BOEING 747
599	1037.42	1044.90	7.48	ATERRIZAJES PESADA	BOEING 777-200
616	1068.46	1076.98	8.51	ATERRIZAJES PESADA	BOEING 747
627	1077.02	1089.24	12.22	ATERRIZAJES PESADA	BOEING 777-200
636	1087.86	1099.62	11.77	ATERRIZAJES PESADA	BOEING 767-300
652	1106.41	1116.59	10.18	ATERRIZAJES PESADA	AIRBUS 340-640
660	1117.31	1125.45	8.13	ATERRIZAJES PESADA	BOEING 747
675	1135.87	1147.21	11.33	ATERRIZAJES PESADA	BOEING 777-200
714	1180.20	1191.12	10.91	ATERRIZAJES PESADA	MD-11
724	1196.57	1209.08	12.52	ATERRIZAJES PESADA	AIRBUS 300
872	1388.19	1399.89	11.71	ATERRIZAJES PESADA	AIRBUS 300
887	1408.32	1416.61	8.29	ATERRIZAJES PESADA	AIRBUS 300
893	1417.16	1430.06	12.89	ATERRIZAJES PESADA	DC-8-72
905	1436.05	1439.42	3.37	ATERRIZAJES PESADA	BOEING 767-300

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO 8 Ejemplo de asignación de aeronaves

Resultados obtenidos con el modelo de simulación para aterrizajes de aeronaves de clase grande en el periodo de las 6 a las 24 horas

No. Aeronave	Tiempos de proceso (TP) en minutos			Fuente en simulador	Aeronave asignada
	Inicio	Término	TP		
230	573.68	585.78	12.10	ATERRIZAJES GRANDE	Antonov AN-32
297	654.51	668.89	14.38	ATERRIZAJES GRANDE	MD-80-83
305	659.75	675.41	15.66	ATERRIZAJES GRANDE	MD-80-82
354	725.57	736.62	11.05	ATERRIZAJES GRANDE	BOEING 757-200
379	765.56	778.25	12.69	ATERRIZAJES GRANDE	BOEING 757-200
536	962.13	972.33	10.20	ATERRIZAJES GRANDE	MD-80-82
584	1015.57	1027.28	11.71	ATERRIZAJES GRANDE	MD-80-83
657	1112.86	1126.76	13.90	ATERRIZAJES GRANDE	MD-80-83
707	1174.00	1188.35	14.35	ATERRIZAJES GRANDE	MD-80-82
736	1205.17	1216.55	11.38	ATERRIZAJES GRANDE	BOEING 757-200
745	1220.52	1232.18	11.66	ATERRIZAJES GRANDE	BOEING 757-200
749	1227.21	1238.55	11.34	ATERRIZAJES GRANDE	GULFSTREAM III

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO 9 Ejemplo de asignación de aeronaves

Resultados obtenidos con el modelo de simulación para aterrizajes de aeronaves de clase pequeña en el periodo de las 6 a las 24 horas

No. Aeronave	Tiempos de proceso (TP) en minutos			Fuente en simulador	Aeronave asignada
	Inicio	Término	TP		
75	379.21	386.94	7.73	ATERRIZAJES PEQUEÑA	SWEARINGEN SA-226TB
94	397.67	408.53	10.86	ATERRIZAJES PEQUEÑA	SWEARINGEN SA-226TB
107	409.09	420.97	11.88	ATERRIZAJES PEQUEÑA	CASA/IPTN CN-235
190	512.07	524.17	12.10	ATERRIZAJES PEQUEÑA	Fairchild-Dornier 328JET
239	582.50	594.15	11.66	ATERRIZAJES PEQUEÑA	SWEARINGEN SA-226TB
421	821.54	830.11	8.57	ATERRIZAJES PEQUEÑA	DE HAVILLAND CANADA DHC-6 TWIN OTTER
506	923.59	934.16	10.57	ATERRIZAJES PEQUEÑA	LEARJET 35
552	976.24	985.36	9.12	ATERRIZAJES PEQUEÑA	DE HAVILLAND CANADA DHC-8-200 DASH 8
578	1012.13	1020.24	8.11	ATERRIZAJES PEQUEÑA	552 CITATION II OR 550 CITATION BRAVO
642	1097.00	1106.70	9.70	ATERRIZAJES PEQUEÑA	552 CITATION II OR 550 CITATION BRAVO
666	1120.16	1132.49	12.33	ATERRIZAJES PEQUEÑA	DE HAVILLAND CANADA DHC-6 TWIN OTTER
681	1141.07	1149.34	8.28	ATERRIZAJES PEQUEÑA	CASA/IPTN CN-235
712	1176.50	1190.85	14.34	ATERRIZAJES PEQUEÑA	DE HAVILLAND CANADA DHC-8-200 DASH 8
775	1262.39	1273.32	10.93	ATERRIZAJES PEQUEÑA	LEARJET 25
836	1348.11	1362.29	14.19	ATERRIZAJES PEQUEÑA	DE HAVILLAND CANADA DHC-6 TWIN OTTER
840	1350.52	1369.57	19.05	ATERRIZAJES PEQUEÑA	NORTH AMERICAN NA-265 SABRELINER 40
846	1354.94	1367.24	12.30	ATERRIZAJES PEQUEÑA	CASA/IPTN CN-235
851	1357.16	1370.57	13.42	ATERRIZAJES PEQUEÑA	LEARJET 24
868	1384.30	1394.14	9.84	ATERRIZAJES PEQUEÑA	NORTH AMERICAN NA-265 SABRELINER 40

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO 10 Ejemplo de asignación de aeronaves

Resultados obtenidos con el modelo de simulación para despegues de aeronaves de clase pesada en el periodo de las 6 a las 24 horas

No. Aeronave	Tiempos de proceso (TP) en minutos			Fuente en simulador	Aeronave asignada
	Inicio	Término	TP		
61	367.55	375.01	7.46	DESPEGUES PESADA	BOEING 767-300
68	375.09	378.65	3.56	DESPEGUES PESADA	AIRBUS 340-300
85	389.77	395.56	5.79	DESPEGUES PESADA	BOEING 767-200
113	424.66	428.64	3.98	DESPEGUES PESADA	AIRBUS 300
493	912.17	915.30	3.13	DESPEGUES PESADA	BOEING 777-200
563	992.03	996.12	4.09	DESPEGUES PESADA	AIRBUS 300
833	1345.91	1349.71	3.81	DESPEGUES PESADA	BOEING 777-200
837	1348.29	1351.66	3.37	DESPEGUES PESADA	BOEING 777-200
908	1438.18	1439.81	1.63	DESPEGUES PESADA	DC-8-72

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO 11 Ejemplo de asignación de aeronaves

Resultados obtenidos con el modelo de simulación para despegues de aeronaves de clase grande en el periodo de las 6 a las 24 horas

No. Aeronave	Tiempos de proceso (TP) en minutos			Fuente en simulador	Aeronave asignada
	Inicio	Término	TP		
180	501.27	514.24	12.96	DESPEGUES GRANDE	Bombardier CRJ200
246	592.51	596.70	4.19	DESPEGUES GRANDE	GULFSTREAM II
330	691.83	695.65	3.82	DESPEGUES GRANDE	MD-80-82
333	702.61	706.51	3.90	DESPEGUES GRANDE	MD-80-83
356	726.59	729.13	2.54	DESPEGUES GRANDE	BOEING 757-200
390	777.95	784.83	6.88	DESPEGUES GRANDE	BOEING 727-200
396	786.32	790.20	3.88	DESPEGUES GRANDE	MD-80-82
407	802.07	809.16	7.09	DESPEGUES GRANDE	Antonov AN-32
416	814.96	822.52	7.57	DESPEGUES GRANDE	BOEING 757-200
425	825.38	828.58	3.20	DESPEGUES GRANDE	MD-80-83
449	854.85	859.17	4.32	DESPEGUES GRANDE	MD-80-83
507	924.19	926.69	2.50	DESPEGUES GRANDE	MD-80-83
558	985.89	990.71	4.82	DESPEGUES GRANDE	BOEING 757-200
564	993.59	996.58	2.99	DESPEGUES GRANDE	MD-80-82
569	1000.67	1003.58	2.91	DESPEGUES GRANDE	BOEING 757-200
825	1336.64	1340.81	4.17	DESPEGUES GRANDE	BOEING 757-200
830	1340.64	1344.13	3.49	DESPEGUES GRANDE	MD-80-82

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO 12 Ejemplo de asignación de aeronaves

Resultados obtenidos con el modelo de simulación para despegues de aeronaves de clase pequeña en el periodo de las 6 a las 24 horas

No. Aeronave	Tiempos de proceso (TP) en minutos			Fuente en simulador	Aeronave asignada
	Inicio	Término	TP		
121	436.96	440.78	3.82	DESPEGUES PEQUEÑA	DE HAVILLAND CANADA DHC-8-200 DASH 8
134	448.86	456.14	7.28	DESPEGUES PEQUEÑA	DE HAVILLAND CANADA DHC-6 TWIN OTTER
276	626.39	629.66	3.28	DESPEGUES PEQUEÑA	CASA/IPTN CN-235
298	655.30	658.30	2.99	DESPEGUES PEQUEÑA	552 CITATION II OR 550 CITATION BRAVO
327	690.25	694.77	4.51	DESPEGUES PEQUEÑA	LEARJET 35
345	711.94	715.84	3.89	DESPEGUES PEQUEÑA	552 CITATION II OR 550 CITATION BRAVO
381	771.61	774.18	2.57	DESPEGUES PEQUEÑA	IAI ARAVA
433	834.09	839.12	5.03	DESPEGUES PEQUEÑA	DE HAVILLAND CANADA DHC-6 TWIN OTTER
460	869.48	873.18	3.70	DESPEGUES PEQUEÑA	LEARJET 45
474	884.52	887.52	3.00	DESPEGUES PEQUEÑA	LEARJET 60
576	1010.50	1013.50	3.00	DESPEGUES PEQUEÑA	Dornier 328
663	1118.36	1123.16	4.80	DESPEGUES PEQUEÑA	DE HAVILLAND CANADA DHC-8-200 DASH 8
680	1138.11	1142.02	3.90	DESPEGUES PEQUEÑA	DE HAVILLAND CANADA DHC-6 TWIN OTTER

Fuente: Elaboración propia.

CIUDAD DE MÉXICO

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

SANFANDILA

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



**INSTITUTO
MEXICANO DEL
TRANSPORTE**



www.imt.mx
publicaciones@imt.mx