

## ESTRATEGIA PARA REDUCIR LAS EMISIONES DE GASES CONTAMINANTES EN AEROPUERTOS SATURADOS

Santiago Servin Caballero<sup>a</sup> y Alfonso Herrera García<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Chihuahua

Circuito No. 1, Campus Universitario 2. Chihuahua, C.P. 31125. Chihuahua, México.

<sup>b</sup>Coordinación de Integración del Transporte, Instituto Mexicano del Transporte

Km. 12, Carretera Querétaro-Galindo, Sanfandila, Mpio. Pedro Escobedo, C.P. 76703. Querétaro, México.

Email: [aherrera@imt.mx](mailto:aherrera@imt.mx)

### 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>. Para obtener la evaluación de los beneficios señalados se desarrolló un modelo de simulación de las operaciones aéreas. Los resultados indican que al aplicar la nueva estrategia se pueden reducir significativamente las emisiones de CO<sub>2</sub>. Por ejemplo, con la demanda de servicio de enero de 2011, se obtuvo una reducción de 390 toneladas de CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>, 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 CO<sub>2</sub>.*

**Palabras clave:** aeronave, aeropuerto, algoritmo heurístico, CO<sub>2</sub>, modelo de simulación.

### 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>. In order to obtain the evaluation of the benefits, it was developed a simulation model of the aircraft movements. According to the results, it was estimated that the new strategy could reduce significantly the CO<sub>2</sub> emissions. For instance, a daily reduction of 390 tons of CO<sub>2</sub> was obtained considering the demand of January 2011. Also, it was observed that as the demand increases to the runway maximum capacity, the CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> was estimated.*

**Keywords:** aircraft, airport, CO<sub>2</sub>, heuristic algorithm, simulation model.

## INTRODUCCIÓN

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.

El principal reto del sistema aeroportuario mexicano 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, 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 [1]. Lo anterior implica que la principal infraestructura aeroportuaria de México (el AICM), deberá cubrir la demanda actual y su crecimiento durante algunos años 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 [2]. 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 [2].

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 CO<sub>2</sub>, volumen que lo sitúa dentro de los 15 principales países emisores, con una contribución de alrededor de 1.5% de la emisiones globales. En lo que respecta a las fuentes responsables de emisiones, corresponde 18% al transporte [3]. Como signatario del Protocolo de Kyoto, México tiene el compromiso de reducir las emisiones de GEI [4].

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 [5,6]. 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

Servin y Herrera – Estrategia para reducir las emisiones de gases contaminantes en aeropuertos saturados

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.

### 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:

- Cuantificar los volúmenes de gases contaminantes de las aeronaves que operan en el AICM, bajo las condiciones de 2011.
- Cuantificar el beneficio potencial en 2011, en términos de reducción de emisiones de gases contaminantes, al aplicar la estrategia propuesta.
- 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.

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

### METODOLOGÍA

La metodología comprende los siguientes pasos:

- a) Desarrollar y validar el modelo de simulación del AICM.
- b) Con base en el modelo de simulación desarrollado y la información de las emisiones de gases contaminantes emitidos por los motores de las principales aeronaves que operan en el AICM, estimar las emisiones de gases contaminantes bajo las condiciones operacionales de enero de 2011 y las emisiones que se generarían al aplicar la estrategia propuesta.
- c) Determinar los beneficios potenciales en 2011 y para tres escenarios futuros, en términos de reducción de emisiones de gases contaminantes.

### 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 son los siguientes [1]:

- Formulación del problema.
- Conceptualización del modelo.
- Recolección y procesamiento de datos tomados de la realidad.
- Construcción del modelo en un programa de computadora.
- Realización de pruebas piloto.
- Validación y verificación del modelo.
- Diseño de los experimentos de simulación.
- Simulaciones con el modelo.
- Análisis de los resultados de las simulaciones.

### Formulación del problema

Cualquier estudio de simulación debe iniciar con el establecimiento del problema a resolver. Los objetivos indicarán las preguntas que deben responderse mediante la simulación. Como se señaló en la introducción, el principal reto del AICM es la enorme demanda de servicios que debe atender. Debido a que el AICM es la principal infraestructura aérea de México, también es la que genera los mayores volúmenes de gases contaminantes, derivados de la operación misma y adicionalmente por la

Servin y Herrera – Estrategia para reducir las emisiones de gases contaminantes en aeropuertos saturados

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.

### Modelo conceptual

Es recomendable empezar con un modelo simple para después modificarlo hasta uno de mayor complejidad. En esta etapa se definieron qué aspectos del sistema se representaron en el modelo y cuáles no, además, se estableció 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 primera 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, o su equivalente, 1.02 operaciones/minuto.

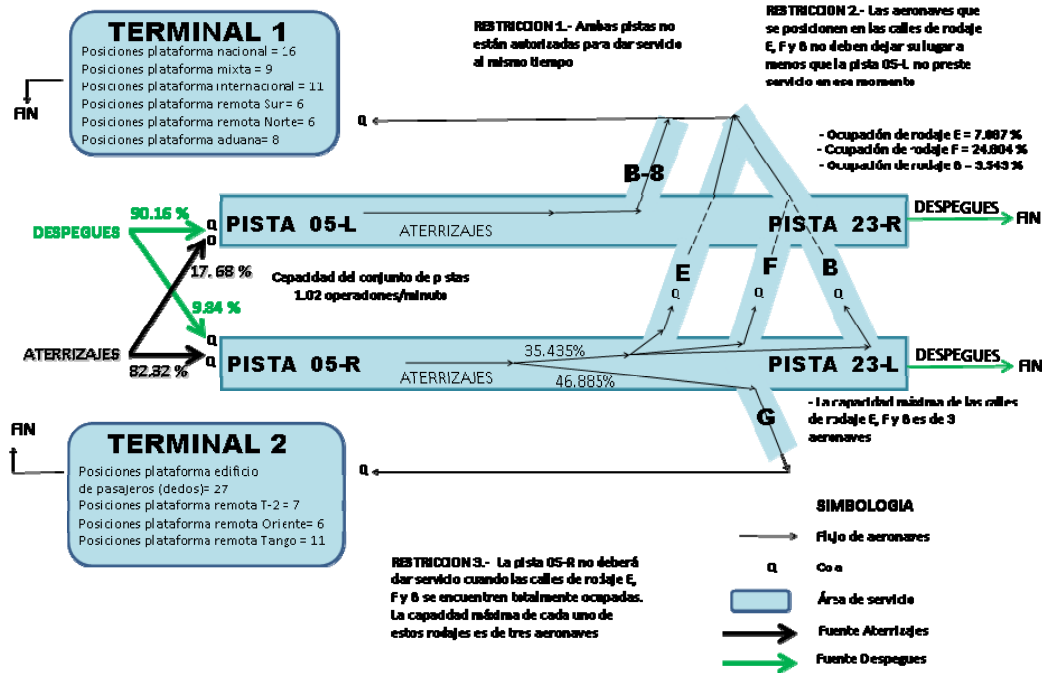
También, es preciso indicar los principales tipos de aeronaves que operan en el AICM. Esta clasificación se estableció para las aeronaves que solicitan aterrizar o despegar dado que estas serán utilizadas como la fuente de generación de aeronaves para elaborar el modelo, y dado que el orden de atención 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. 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 de turbulencia que generan, ya sea como aeronaves pequeñas, grandes o pesadas. Una vez determinados los principales tipos de aeronaves que operan en el AICM, es de gran importancia conocer cómo es el funcionamiento del tránsito del parque aeronáutico dentro del “lado aire”<sup>1</sup> del AICM.

El movimiento del parque aéreo dentro del lado aire del AICM es como sigue: Tomando en cuenta el total de aterrizajes realizados, 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

<sup>1</sup> Los aeropuertos se dividen en dos partes. El lado aire (*air-side*), que incluye las pistas (para aterrizajes y despegues), calles de rodaje y las posiciones de atraque de las aeronaves; y el lado tierra (*land-side*), que está dedicado a los usuarios e incluye terminal de pasajeros, zonas de comercio, aduanas, servicios y estacionamiento de automóviles.

Servin y Herrera – Estrategia para reducir las emisiones de gases contaminantes en aeropuertos saturados

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. 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. 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. 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. 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 1.



Fuente: Elaboración propia.

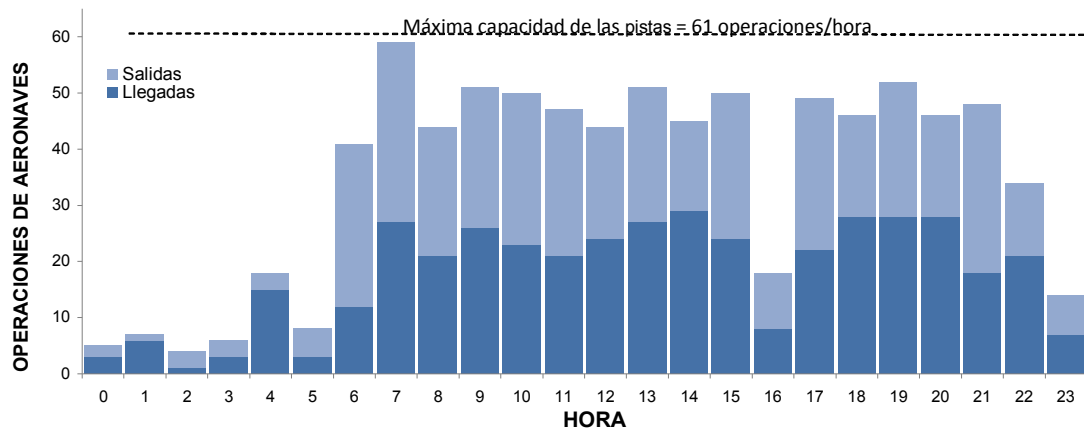
Figura 1. Modelo conceptual del AICM.

**Recolección y procesamiento de datos operativos**

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. Mediante estos datos se obtendrán los valores de los parámetros que serán utilizados durante la programación del modelo de simulación. 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 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

Servin y Herrera – Estrategia para reducir las emisiones de gases contaminantes en aeropuertos saturados

operación del sistema. En la Figura 2 se ilustra el comportamiento de las operaciones en las pistas del AICM, 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, las cuales representan el 5.73% del total de operaciones diarias. 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), 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 Servicios a la Navegación en el Espacio Aéreo Mexicano (SENEAM).

**Figura 2. Operaciones durante un día típico de enero de 2011 en el AICM.**

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.

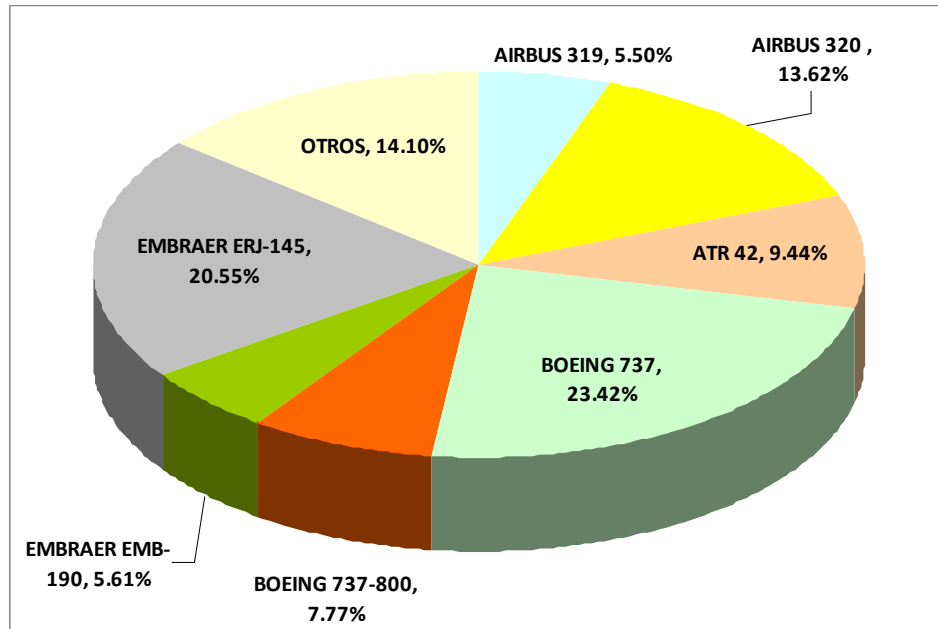
Por otro lado, en la Figura 3 se muestran los porcentajes de operaciones realizadas en el AICM, por los distintos tipos de aeronaves de la aviación comercial. En total fueron observados 39 tipos diferentes de aeronaves, sin embargo, fueron siete los tipos de aeronaves que presentan la mayor demanda de 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.

### **Distribuciones de probabilidad 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. 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. 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 3, 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

Servin y Herrera – Estrategia para reducir las emisiones de gases contaminantes en aeropuertos saturados

fueron agrupadas de acuerdo con la clasificación de estela de turbulencia, la cual está definida en función del máximo peso de despegue certificado [7]. 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.



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

**Figura 3. Porcentaje de operaciones realizadas por los distintos tipos de aeronaves en el AICM (2011).**

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.

Un resumen de las fdp obtenidas se presenta en las tablas 1, 2 y 3.

**Tabla 1. Funciones de densidad de probabilidad de los despegues y aterrizajes (0 - 6 horas).**

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 con base en información de SENEAM.

Servin y Herrera – Estrategia para reducir las emisiones de gases contaminantes en aeropuertos saturados

**Tabla 2. Funciones de densidad de probabilidad de los despegues (6 - 24 horas).**

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 con base en información de SENEAM.

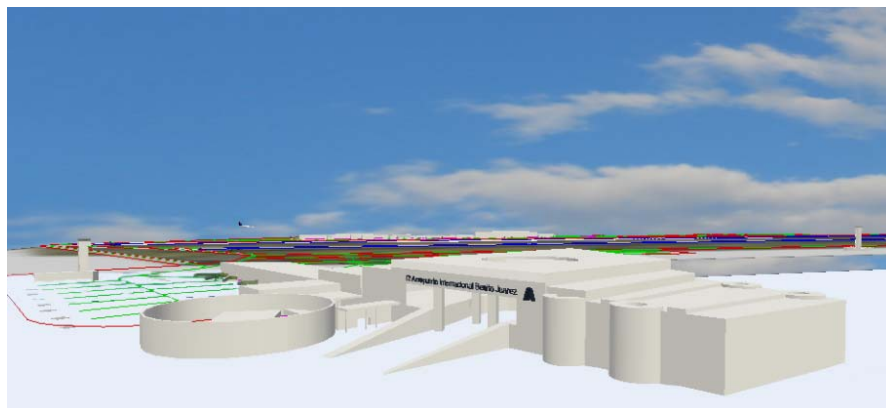
**Tabla 3. Funciones de densidad de probabilidad de los aterrizajes (6 - 24 horas).**

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 con base en información de SENEAM.

### Construcción del modelo en un programa de computadora

En esta etapa, el modelo conceptual especificado se codificó en un formato reconocido por una 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 FlexSim, por lo cual éste fue utilizado. Cabe señalar que dicho programa tiene la ventaja adicional de obtener visualizaciones en tercera dimensión del modelo (Figura 4).



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 4. Vista en tercera dimensión del modelo de simulación del AICM.**



Servin y Herrera – Estrategia para reducir las emisiones de gases contaminantes en aeropuertos saturados

### **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.

### **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.

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 (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.
- Verificación de la distribución de destinos de las aeronaves hacia las terminales del aeropuerto.
- Verificación de la utilización de las calles de rodaje, de las aeronaves que tienen como destino la Terminal 1.
- Verificación de la restricción número 2 del modelo (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 pista 05-R no debe ofrecer servicio cuando las calles de rodaje ECO, FOX y BRAVO se encuentren totalmente ocupadas).
- 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.

### **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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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, considerando una ocupación de las pistas del 80%, 90% y 100% de su capacidad máxima.

### **Estimación de emisiones de CO<sub>2</sub> en el AICM, bajo las condiciones operacionales de enero de 2011**

La estimación de las emisiones para cada aeronave iniciará en el momento en que ésta solicite servicio en pista, ya sea para despegar o aterrizar. Una vez que las aeronaves obtienen permiso para aterrizar, éstas se dirigen hacia la pista que les fue asignada y realizan esta operación, para posteriormente desalojarla por alguno rodaje y en seguida se dirigen hacia su terminal de destino, 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

Servin y Herrera – Estrategia para reducir las emisiones de gases contaminantes en aeropuertos saturados

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 CO<sub>2</sub> de esta aeronave.

En el caso de que una aeronave obtenga el permiso para despegar, ésta es dirigida desde su plataforma hacia el umbral de la pista que le fue asignada, en donde puede haber una línea de espera, posteriormente, al tocarle su turno inicia 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, 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. 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) [8]. 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. De acuerdo con la OACI [8] por cada litro de combustible de aviación para turbina (turbosina) quemado se generan 2.5887 kilogramos de dióxido de carbono. Considerando un peso específico de la turbosina igual a 0.82 kg/lit, que corresponde a una temperatura de 22° C, de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005.

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. 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<sub>2</sub>, 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. Siguiendo estos pasos se estimó la cantidad de dióxido de carbono generado por las distintas aeronaves que operan durante un día completo, en el AICM, considerando la demanda de servicio existente en enero de 2011.

#### **Algoritmo heurístico para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas por las aeronaves, bajo las condiciones operativas de enero de 2011**

Este enfoque se fundamenta en tres principios establecidos [6]:

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.

Principio tres: El valor de las emisiones promedio es la media de las emisiones mínima y máxima

Este algoritmo fue aplicado para estimar los beneficios potenciales de reordenar la secuencia de atención de las aeronaves, durante los despegues y aterrizajes en el AICM. 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. Para cuantificar los beneficios potenciales de esta estrategia fue 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.

Servin y Herrera – Estrategia para reducir las emisiones de gases contaminantes en aeropuertos saturados

### Estimación de las emisiones de CO<sub>2</sub> para tres escenarios futuros y su reducción al aplicar una nueva política operacional en el AICM

Se consideraron tres escenarios futuros, en los que el conjunto de las dos pistas del AICM opera al 80%, 90% o al 100% de su capacidad máxima. 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. Esta información fue incorporada a un modelo de simulación de eventos discretos [9]. El siguiente paso fue aplicar la estrategia que reduce las emisiones de CO<sub>2</sub>, 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 CO<sub>2</sub>.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Resultados de la estimación de emisiones de CO<sub>2</sub> en el AICM, bajo las condiciones operacionales de enero de 2011 y con la nueva política de atención de aeronaves

En la Tabla 4 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 clave, ya que esta situación es una de las causas que incrementa las emisiones de gases contaminantes por las aeronaves.

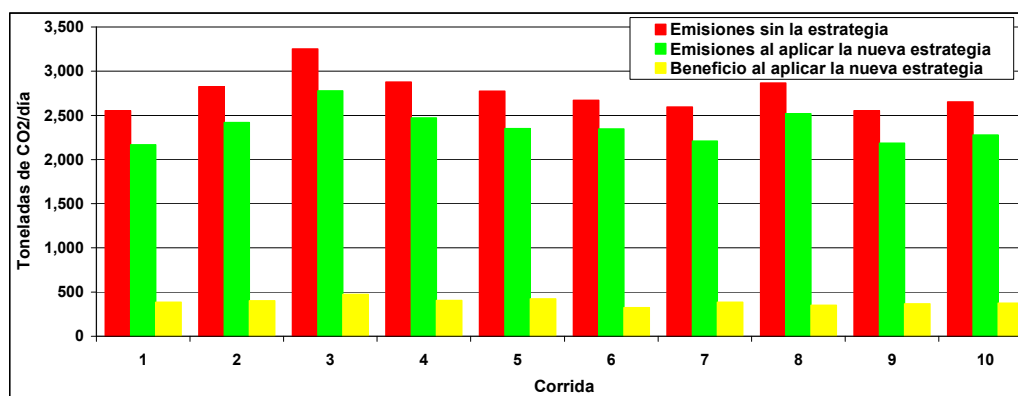
Tabla 4. Tiempos promedio en una operación típica de despegue o aterrizaje.

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

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

Las emisiones de CO<sub>2</sub> fueron estimadas al multiplicar los tiempos totales de proceso de cada aeronave por el valor de sus respectivas emisiones unitarias. 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 estrategia, para comparar las emisiones y obtener cuantitativa los beneficios esperados.

En la Figura 5 se presentan gráficamente los resultados obtenidos en cada una de las diez corridas de simulación realizadas. Se pueden comparar las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas con la política actual y las que resultan cuando se aplica la nueva estrategia, además se presentan los beneficios obtenidos (reducción de emisiones).



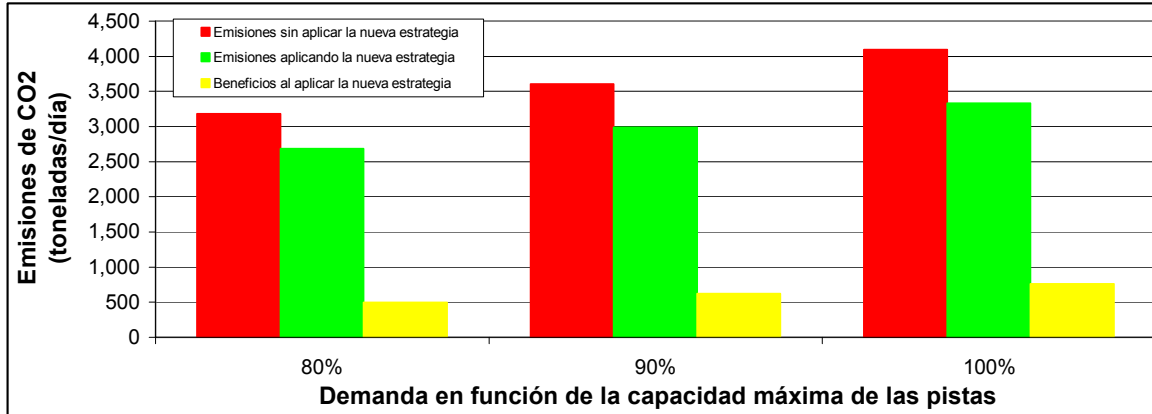
Fuente: Elaboración propia.

Figura 5. Emisiones de CO<sub>2</sub> bajo las condiciones operacionales de enero de 2011

Servin y Herrera – Estrategia para reducir las emisiones de gases contaminantes en aeropuertos saturados

**Resultados de la estimación de emisiones de CO<sub>2</sub> para tres escenarios futuros y su reducción al aplicar la estrategia propuesta**

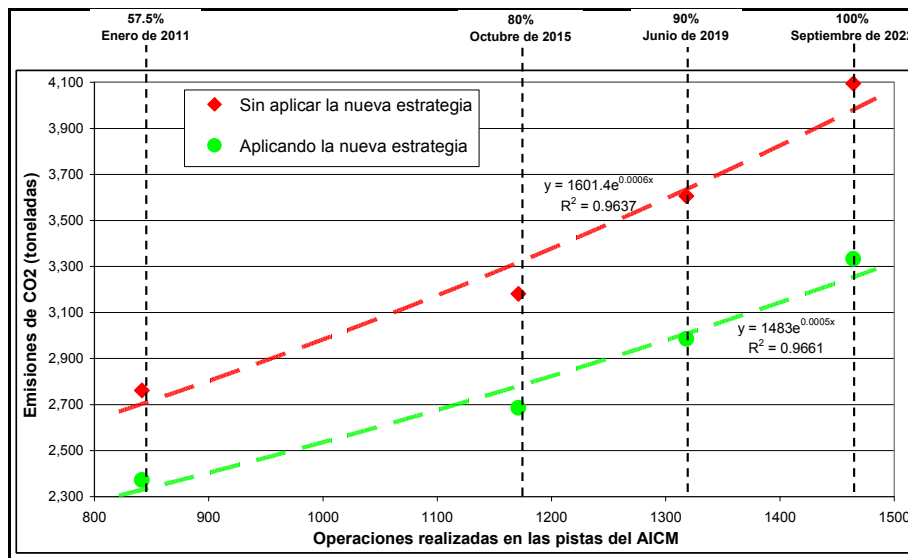
En la Figura 6 se presenta un resumen de los resultados obtenidos para cada escenario planteado. Se presentan las estimaciones de las emisiones generadas por las aeronaves operando con el orden de atención tradicional (barras rojas), así como las que resultan al aplicar la nueva estrategia (barras verdes). Las diferencias de estos valores representan el beneficio potencial de la nueva estrategia (barras amarillas). Conforme se acerca la demanda de servicio a la capacidad máxima de las pistas, se incrementan las emisiones de CO<sub>2</sub>, pero también los beneficios potenciales de la nueva estrategia. Se puede obtener hasta un 19% en la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> ó 762 toneladas de CO<sub>2</sub> por día, cuando se aplica la nueva estrategia.



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 6. Emisiones de CO<sub>2</sub> para tres escenarios futuros.**

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 7 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.



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 7. Comportamiento exponencial de la generación de CO<sub>2</sub> conforme se incrementa la demanda.**

Servin y Herrera – Estrategia para reducir las emisiones de gases contaminantes en aeropuertos saturados

En la Figura 7 también, se indican las fechas estimadas en las que se obtendrían las demandas de 80%, 90% y 100% de la capacidad máxima, considerando un crecimiento moderado de la demanda [9]. De acuerdo con estas estimaciones pronto se alcanzarán valores críticos en la operación del AICM. Por último, también se observa 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.

## CONCLUSIONES

Al aplicar la estrategia propuesta, se obtienen ahorros significativos en la reducción de emisiones de gases contaminantes en el AICM, además, se generan volúmenes de gases contaminantes con una proporción exponencial, conforme aumenta la demanda de servicio.

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.

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 CO<sub>2</sub>. 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 CO<sub>2</sub> diarias.

También, se observó que conforme se acerca la demanda de servicio a la capacidad máxima de las pistas, se incrementan las emisiones de CO<sub>2</sub>, 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>, lo cual implica cambiar el orden de atención tradicional de las aeronaves. 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.

## REFERENCIAS

- [1] 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.
- [2] 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. México.
- [3] Gobierno de los Estados Unidos Mexicanos. Presidencia de la República. 2007. Plan Nacional de Desarrollo 2007-2012. México.
- [4] Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). 2008. Programa Sectorial de Comunicaciones y Transportes 2007-2012. México.

Servin y Herrera – Estrategia para reducir las emisiones de gases contaminantes en aeropuertos saturados

- [5] 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.
  
- [6] 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.
  
- [7] Federal Aviation Administration (FAA). 2010. Air Traffic Control. JO 7110.65T. U.S. Department of Transportation. Effective Date: February 11, 2010. USA.
  
- [8] <http://www2.icao.int/en/carbonoffset/Documents/ICAO%20MethodologyV3.pdf>
  
- [9] 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.