

## **CAPACIDAD AEROPORTUARIA: ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LAS VARIABLES ALEATORIAS SOBRE EL LADO AIRE MEDIANTE EL USO DE SIMULACIONES COMPUTACIONALES**

Gabriel Ramírez Díaz, Joaquín Piechocki, Alejandro Di Bernardi

Grupo Transporte Aéreo – UIDET GTA-GIAI, Departamento de Aeronáutica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata. Calle 116 e/ 47 y 48, 1900 La Plata, Buenos Aires, Argentina. Correo electrónico: [ramirezdzia.gabriel@gmail.com](mailto:ramirezdzia.gabriel@gmail.com)

**Palabras claves:** *Aeropuerto, Capacidad operacional, Estadística y probabilidad, Gestión de operaciones, Simulación.*

### **INTRODUCCIÓN**

La capacidad del sistema aeroportuario representa un parámetro de primer orden si se aborda su planificación y/o su gestión. La capacidad puede ser calculada a través de herramientas de base empírica, analíticas y de simulación, las cuales arrojan distintos niveles de detalle en relación a la caracterización de la infraestructura y los procesos que en ella se llevan a cabo. Una de las principales diferencias que existe entre las herramientas anteriormente nombradas, es el cómo se consideran los efectos aleatorios de cada uno de los procesos del sistema.

Si bien es conocido que la capacidad de los sistemas es sensible a la duración de los procesos que lo componen y a los desvíos respecto de los horarios y tiempos estimados de servicio, el impacto de las variables aleatorias en la cuantificación de la capacidad es motivo de especial interés científico y de gestión.

El presente estudio se basó en la utilización de la herramienta de simulación “Airport and AirspaceSimulationModel” (SIMMOD) con el fin de caracterizar la influencia de las variables como el tiempo de retraso en arribos, el tiempo de servicio en plataforma, la duración del proceso de remolque de salida (pushback) y puesta en marcha, sobre las operaciones de arribo, turnaround y partida.

Para el desarrollo de este trabajo, el estudio se estructuró en cinco etapas. La primera etapa consistió en adoptar modelos representativos de distribución asociada a cada uno de los procesos previamente nombrados. La segunda se abocó a la construcción del modelo del sistema aeroportuario mediante la herramienta SIMMOD[1]. En la tercera etapa se simuló el sistema considerando las distribuciones de las variables aleatorias del proceso. En la cuarta etapa se estudió la respuesta del sistema frente a la variación de los parámetros (media, mediana y varianza) de las distribuciones. En la quinta y última etapa se cuantificó el impacto y sensibilidad del sistema.

### **DESARROLLO**

#### **Definición de distribuciones de probabilidad**

Los procesos asociados a las operaciones de arribo, turnaround y partida, fueron caracterizados a partir de distribuciones representativas de casos particulares relevadas a partir de la literatura disponible. Para cada una las distribuciones obtenidas, se identificaron

los parámetros de valor medio y mediana, los cuales fueron empleados posteriormente en la simulación de los procesos.

Los procesos caracterizados a través de las distribuciones fueron: la latencia en arribos, el tiempo de servicio en plataforma, el tiempo de pushback y puesta en marcha.

La latencia (retraso respecto al horario programado se puede interpretar como el conjunto de demoras generadas en procesos no modelados, generadores de la dispersión en el horario de arribo de aeronaves. Este parámetro se introdujo en el modelo por medio de la distribución que se presenta en la Figura 1, la cual fue elaborada a partir del procesamiento de los datos publicados por estudios de referencia [2] donde se presenta un modelo analítico para simular la eficiencia de las operaciones turnaround en aeropuertos.

El tiempo de servicio tiene asociada la distribución N° 1 de probabilidad que se muestra en la Figura 2, la cual fue creada a través del procesamiento de los datos publicados[3] sobre el análisis de los AirlineServiceQuality Performance (ASQP). La distribución de probabilidad adoptada corresponde a una aeronave categoría Large (como es una aeronave B737-800) bajo la clasificación FAA. En el caso de la distribución N° 2 se planteó un tiempo mínimo de servicio coincidente con la mediana de la distribución N° 1, considerándose de este modo, a la distribución N° 2 como una representación más habitual en el contexto nacional, en donde no se solicita abandonar las posiciones de estacionamiento de manera anticipada.

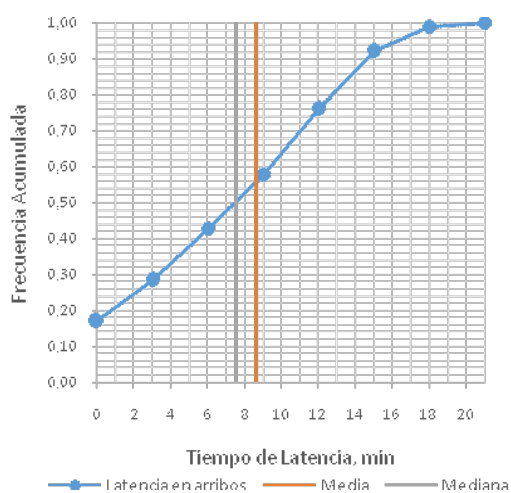


Figura 1

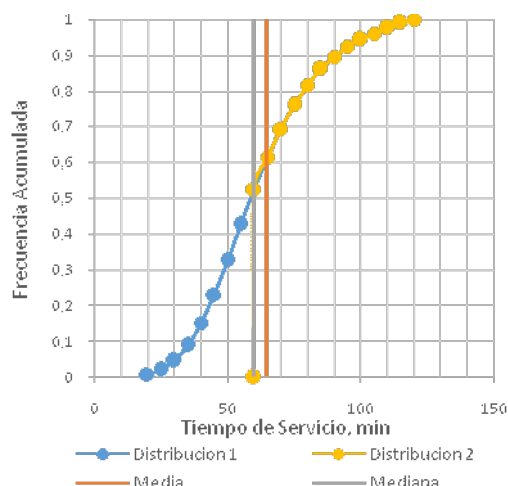


Figura 2

Figura 1) Distribución estadística del tiempo de latencia en arribos, 2) Distribuciones estadísticas del tiempo en plataforma.

Al procedimiento de pushback se le asignan dos distribuciones de probabilidad, una asociada al procedimiento del posicionamiento y alineación de la aeronave en la calle de rodaje (Figura 3) y la otra asociada al tiempo de permanencia (posterior al remolque) de la aeronave sobre el eje de la calle de rodaje (Figura 4). Durante este tiempo de permanencia se genera la liberación del tren delantero de la aeronave y puesta en marcha de la misma. La distribuciones de la Figura 3 y la Figura 4 fueron construidas a partir del procesamiento de los datos publicados [4], en donde se presentan los tiempos de duración de los diferentes procesos llevados a cabo en el aeropuerto de Charlotte Douglas (CLT).

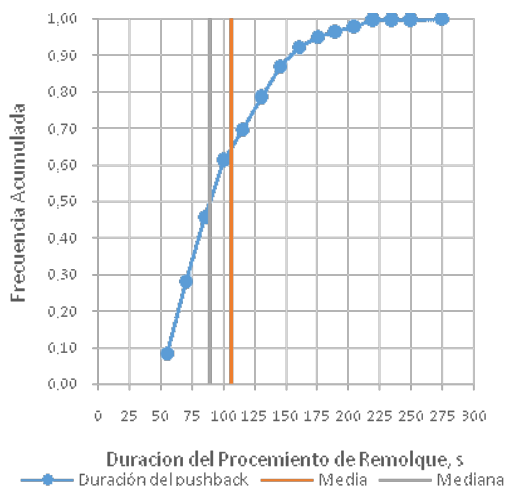


Figura 3

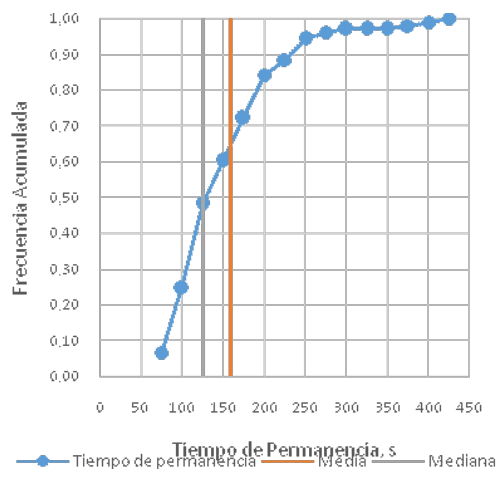


Figura 4

Figura 3) Distribución estadística de la duración del procedimiento de pushback, 4) Distribución estadística del tiempo de permanencia y puesta en marcha posterior al pushback.

### Modelos de simulación del sistema aeroportuario

Los modelos de simulación consisten en aeropuertos de pista única y rodaje paralelo en toda su extensión dotados de una plataforma lineal con distintas cantidades de puestos de estacionamiento (16, 20, 30, 40, 50 y 60 puestos). El módulo de plataforma, en todos los casos, fue configurado con un rodaje de ingreso y a un rodaje de salida de plataforma, los cuales son paralelos a la pista considerada en el sistema bajo análisis.

El modelo de simulación incluye, en su definición, la configuración esquemática del aeropuerto (respetando los criterios de diseño de ICAO [5] y la FAA [6], los tipos de aeronaves (categoría y modelo, que en el caso bajo análisis se consideró al B737-800), programación del día de diseño ( que en el caso bajo análisis se consideró como demanda constante, con una tasa de arribo de una aeronave cada 3 minutos durante un franja de 5 horas), reglas operativas asociadas a los procedimientos de despegue-arribo y reglas de operación asignada al uso de la infraestructura (separaciones por estela turbulenta, velocidades de rodaje, entre otras, respetando estándares de seguridad).

### Simulaciones

Los módulos de plataforma construidos fueron simulados en distintos escenarios. Cada escenario se encuentra definido según la caracterización de la latencia, el tiempo de servicio, el proceso de remolque, y el tiempo de permanencia sobre la calle de rodaje como parte del proceso del pushback. La Tabla 1 indica cómo fueron construidos dichos escenarios. En esta tabla se simboliza con  $x$  los casos en donde el procedimiento adoptó como tiempo de servicio el valor medio de la distribución asociada al procedimiento.  $Me$  indica que este valor se correspondió con la mediana de las distribuciones asociadas, mientras que  $fdp$  indica que los tiempos de servicio se distribuyeron de acuerdo a las distribuciones de probabilidad presentadas en Figuras 1 a 4. De este modo, se generaron 14 escenarios para cada configuración de puestos de estacionamiento (16, 20, 30, 40, 50 y 60 puestos), dando lugar a un total de 84 casos.

Para cada uno de los escenarios se realizaron 20 iteraciones, a partir de las cuales se obtuvieron los valores promedios de demoras asociadas a los segmentos de ruta en arribo, rodaje de ingreso, posición de estacionamiento, rodaje de partida, cola de partida y ruta en partida. Si bien los resultados fueron obtenidos para cada segmento operativo, en el

presente informe se encuentran presentados en: demoras en arribos, demoras en partida y demoras totales.

Escenario	Latencia	Tiempo de servicio	Tiempo de servicio	Remolque	Permanencia
		Distribución 1	Distribución 2		
1	$\bar{x}$	$\bar{x}$	$\bar{x}$	$\bar{x}$	$\bar{x}$
2	<i>fdp</i>	$\bar{x}$	$\bar{x}$	$\bar{x}$	$\bar{x}$
3	$\bar{x}$	<i>fdp</i>	<i>nc</i>	$\bar{x}$	$\bar{x}$
4	$\bar{x}$	<i>nc</i>	<i>fdp</i>	$\bar{x}$	$\bar{x}$
5	$\bar{x}$	$\bar{x}$	$\bar{x}$	<i>fdp</i>	<i>fdp</i>
6	<i>fdp</i>	<i>fdp</i>	<i>nc</i>	<i>fdp</i>	<i>fdp</i>
7	<i>fdp</i>	<i>nc</i>	<i>fdp</i>	<i>fdp</i>	<i>fdp</i>
8	<i>Me</i>	<i>Me</i>	<i>Me</i>	<i>Me</i>	<i>Me</i>
9	<i>fdp</i>	<i>Me</i>	<i>Me</i>	<i>Me</i>	<i>Me</i>
10	<i>Me</i>	<i>fdp</i>	<i>fdp</i>	<i>Me</i>	<i>Me</i>
11	<i>Me</i>	<i>nc</i>	<i>fdp</i>	<i>Me</i>	<i>Me</i>
12	<i>Me</i>	<i>Me</i>	<i>Me</i>	<i>fdp</i>	<i>fdp</i>
13	<i>fdp</i>	<i>fdp</i>	<i>nc</i>	<i>fdp</i>	<i>fdp</i>
14	<i>fdp</i>	<i>nc</i>	<i>fdp</i>	<i>fdp</i>	<i>fdp</i>

Tabla 1 Escenarios de análisis, donde *fdp* indica que se aplicó una distribución de probabilidad al considerar los tiempos del procedimiento,  $\bar{x}$  indica que se consideró su valor medio *Me* su mediana. *nc* indica que no corresponde.

## RESULTADOS

En las Figuras 5, 6, 7 y 8 se presentan los resultados obtenidos para los escenarios 8 a 14, los cuales corresponden a la combinación del parámetro Mediana (*Me*) y las distribuciones de probabilidad, tal y como se detalla en la Tabla 1.

El escenario 8 (el cual no considera ninguna distribución y en su lugar emplea como parámetro la Mediana) se toma como punto de referencia para los escenarios 9 a 14 (escenarios que combinan la Mediana y la función de distribución de probabilidad).

En las Figuras 5, y 7 se puede observar el comportamiento de los niveles de demora en arribos y totales, para la tipología de plataforma estudiada y bajo la condición de demanda impuesta. En dichas figuras, se puede verificar la relación entre capacidad y demanda, la cual indica que, para una determinada capacidad, los niveles de demora aumentan exponencialmente a medida que se incrementa la demanda. La Figura 5 evidencia dos zonas. La primera zona presenta demoras netas que resultan inviables de afrontar en la práctica. El límite de la primera zona indica el punto a partir del cual la capacidad comienza a presentar un balance con la demanda, cuya frontera se encuentra entorno a los 30 puestos. En la zona 2, es en la que corresponde realizar el análisis del sistema ya que es donde los niveles de demora resultan viables de afrontar en la práctica.

En las Figuras 7 y 8, se observan los resultados de la demora total. En el caso de estudio, a partir de los 50 puestos de estacionamiento los niveles de demora presentan un comportamiento asintótico en distintos escenarios (con un leve aumento en la demora, para el caso en que se contempla la distribución del procedimiento de pushback, escenario 12 y 14). Frente a este comportamiento se puede inferir que, bajo las condiciones de análisis, la generación de puestos adicionales, más allá de los 50 puestos, no repercute significativamente en la reducción de la demora.

En relación a las configuraciones con más de 50 puestos, en los escenarios 12 y 14 puede evidenciarse un aumento en la demora, a pesar de disponer un mayor número de puestos de estacionamiento. Este comportamiento tiene su causa en que las aeronaves demoran un mayor tiempo para llegar a la cola de partida (procedimiento de partida), ya que las probabilidades de encuentro entre las aeronaves en el rodaje y aquellas que se encuentran realizando el procedimiento de pushback aumenta, generando en consecuencia más conflictos operativos que redundan en bloqueos. Este tipo de conflicto se ve potenciado por el aumento de la longitud del rodaje en plataforma sobre el cual la velocidad es menor por procedimientos de seguridad operacional.

Entre los 30 y los 50 puestos de estacionamiento, las reducciones netas de demora varían desde 7.8 y 11.6 min (en la configuración de 30 puestos) hasta 5.6 y 8 min (en la configuración de 50 puestos) según el escenario y las condiciones de estudio. El proceso de diseño de los subsistemas requiere definir el nivel de servicio deseado. Si consideramos la recomendación de la FAA que propone un nivel de servicio 4 minutos de demora por movimiento, entonces se podrá tolerar 8 minutos netos de demora total por operación (un movimiento de arribo y un movimiento de partida), tal como se evidencia en la Figura 8.

En las Figuras 5, 8, 9, 10 y 11 se observa que, excepto en el escenario 9 para las configuraciones de bajo número de puestos de estacionamiento, siempre que se consideraron las distribuciones de probabilidad, se presentaron mayores niveles de demora que en el escenario base, de igual modo cuanto mayor es el grado de aleatoriedad introducido (escenario 13 y 14), mayor es el nivel de demora.

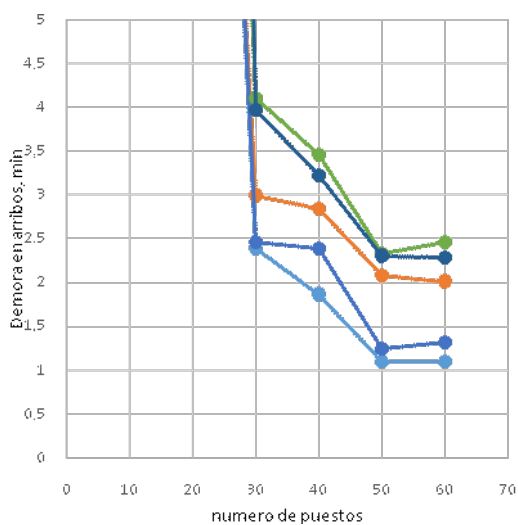


Figura 5

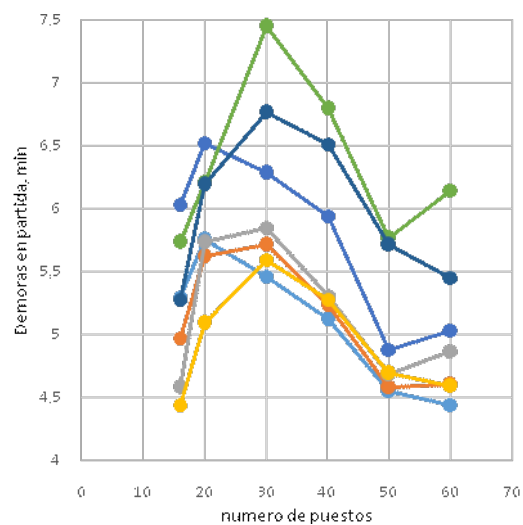


Figura 6

Escenario 8 Escenario 9 Escenario 10 Escenario 11 Escenario 12 Escenario 13 Escenario 14

En las Figuras 9, 10 y 11 se cuantifica en forma porcentual (en el eje de ordenadas) el aumento (valores mayores a 0) o reducción (valores menores a 0) del nivel de demora en arribos, partidas y demora total respectivamente, para los escenarios 9 a 14 con respecto al escenario 8, para cada una de las configuraciones de puestos de estacionamiento (eje de abscisas).

Al considerar aisladamente la latencia (escenario 9) se presentan en las configuraciones con bajo número de puestos de estacionamiento, un nivel de demora ligeramente menor (Figura 9, 10 y 11) que en el caso base. En primera instancia se presupone que la latencia introduce una condición de demanda sobre los sistemas de baja capacidad (bajo número de puestos de estacionamiento) que permite amortiguar la llegada de aeronaves y disminuir la demora total, condición que para una llegada constante puede generar que algunas aeronaves

presenten demoras excesivas por tener que esperar ciclos completos para la liberación de puestos en plataforma.

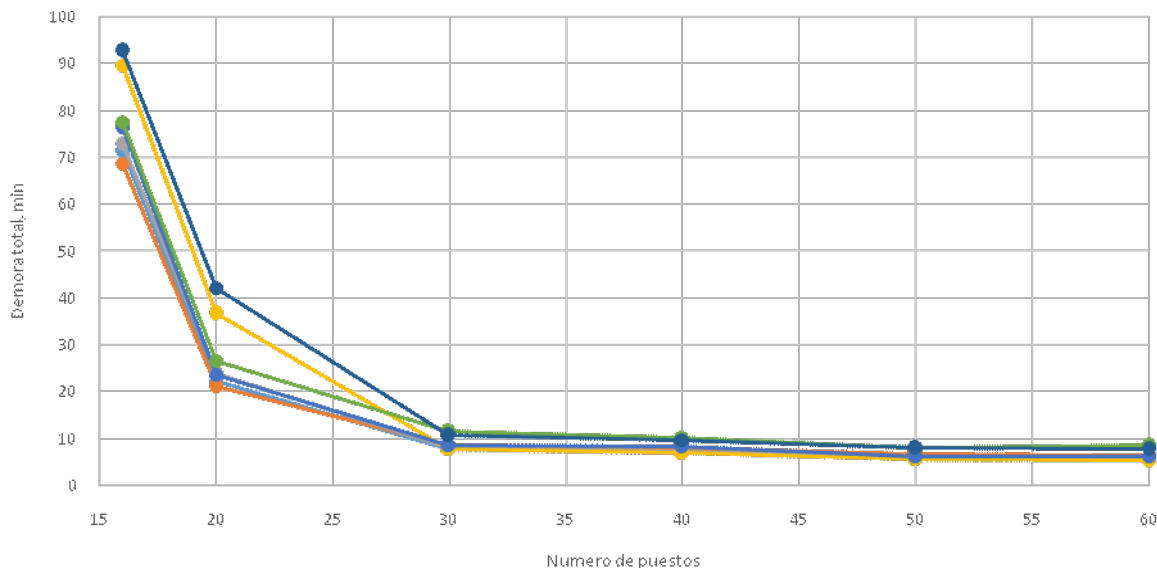


Figura 7

En el escenario 10 (tiempo de servicio entre 30 y 120 minutos) se presenta (tal como era de esperarse, por el grado de aleatoriedad introducido en la simulación) un aumento en las demoras totales (Figura 11), para todas las configuraciones.

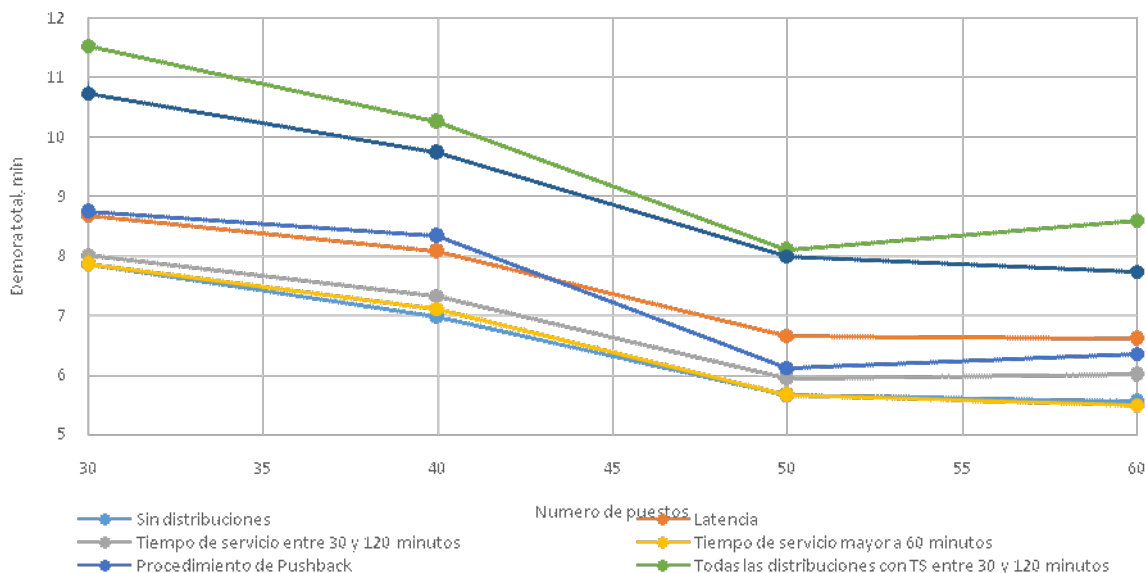


Figura 8

En el escenario 11 (tiempo de servicio mayor a 60 minutos), el cual presenta una distribución que demanda un mayor uso de la infraestructura, se presenta un aumento considerable en la demora para las configuraciones con bajo número de puestos de estacionamiento. Para las configuraciones con un elevado número de puestos (más de 30 puestos) el impacto generado es mínimo.

En el escenario 12 (el cual considera la aleatoriedad del procedimiento de pushback) se puede observar (Figura 9, 10y 11) un aumento en los niveles de demora, los cuales

repercuten principalmente en los vuelos de partida (que son quienes realizan el procedimiento de pushback) y en menor medida en las aeronaves que arriban (las cuales, a pesar de que pueden ser reasignadas a otros puestos de estacionamientos cuando estos se encuentran disponibles, hayan obstáculos durante su rodaje en plataforma).

En el escenario 13 (el cual considera la totalidad de las distribuciones) puede observarse que en todos los casos se genera un aumento en los niveles de demora, tanto en arribos como partidas, y por ende en demoras totales. El nivel de demora que se observa si bien es del orden de la superposición de las demoras introducidas por cada escenario (escenario 9, 10 y 12), se presenta como ligeramente superior.

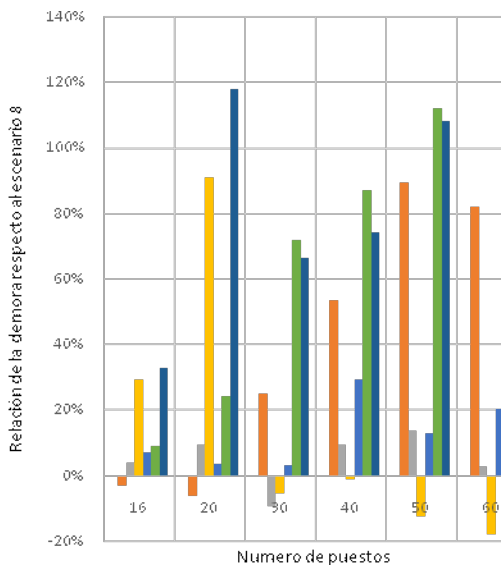


Figura 9

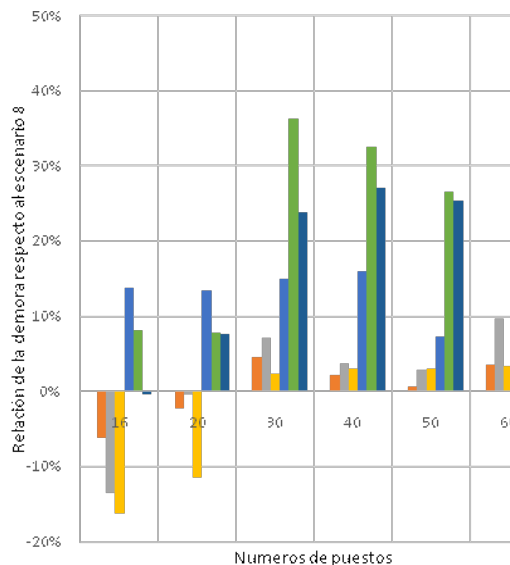


Figura 10

Escenario 8 Escenario 9 Escenario 10 Escenario 11 Escenario 12 Escenario 13 Escenario 14

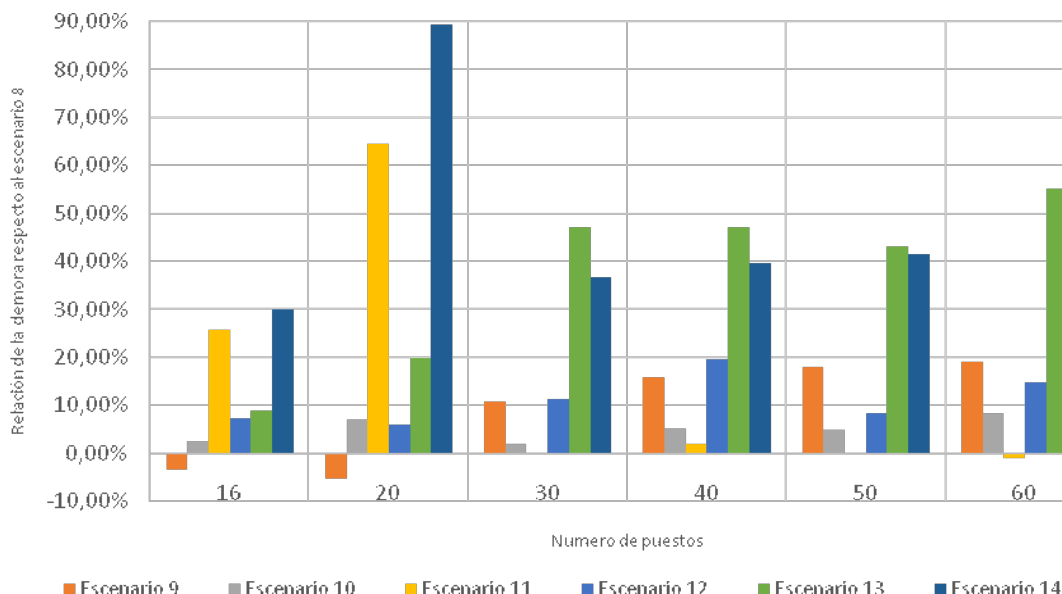


Figura 11

De forma análoga a los escenarios 8 a 14, se cuantifico la demora para los escenarios 1 a 7. El Escenario 1, que considera tiempos fijados en la media de las distribuciones, fue considerado como base.

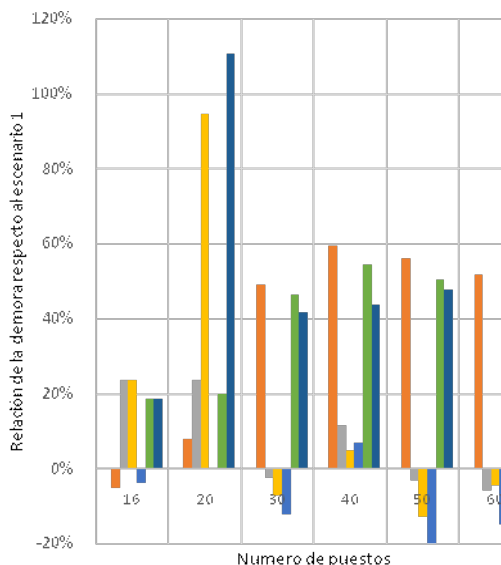


Figura 12

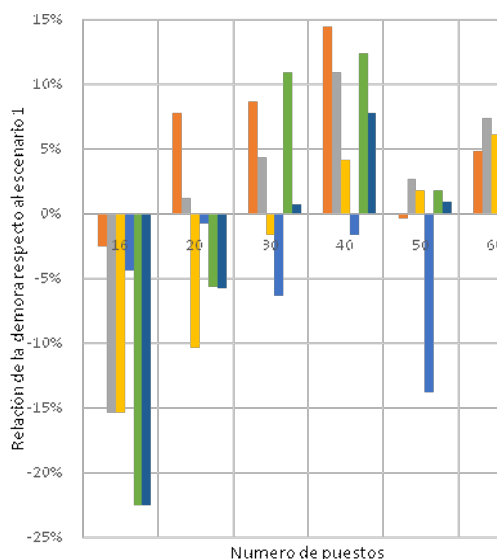


Figura 13

Escenario 1    Escenario 2    Escenario 3    Escenario 4    Escenario 5    Escenario 6    Escenario 7

## CONCLUSIONES

La consideración de las distribuciones de probabilidad en forma conjunta (escenarios 13 y 14) repercute en un aumento en los valores netos de demora total, entre un 8% y un 90% respecto del escenario 8 (sin distribución de probabilidad, basado en el parámetro de la Mediana) según el número de puestos totales en plataforma. Con un aumento promedio del 44% del nivel de demora respecto del escenario base.



El aumento en la demora se presenta incluso en aquellas condiciones en las que las distribuciones empleadas presuponen un menor uso de la infraestructura, tal como ocurre con el escenario 3, 6, 10 y 13 donde los tiempos de servicio pueden tomar valores entre 30 y 120 min.

Al considerar las distribuciones asociadas al pushback (escenario 12) se genera un aumento en los niveles de demora en todos los módulos de plataforma, siendo la demora total generada casi constante. Sin embargo, se pueden observar que, para los módulos con menor número de puestos de estacionamiento, las demoras se generan principalmente en el arribo, mientras que, para los módulos con mayor número de puestos, las demoras se generan principalmente en las partidas.

El proceso diseño de los subsistemas, que requiere definir el nivel de servicio deseado, el punto diseño para que satisfice el nivel de servicio objetivo, se ve fuertemente influenciado por las consideraciones realizadas (selección y/o caracterización del escenario de simulación).

Las demoras que se observan al considerar los procedimientos en forma conjunta, como lo fue en el caso de los escenarios 13 y 14, son proporcionales a las demoras que se presentaron al analizar las distribuciones por separado (escenario 9, 10, 11 y 12).

#### REFERENCIAS

- [1] FAA, "Simmod Manual: How SIMMOD Works," pp. 1–79.
- [2] C.-L. Wu and R. E. Caves, "Modelling and optimization of aircraft turnaround time at an airport," *Transp. Plan. Technol.*, vol. 27, pp. 47–66, 2004.
- [3] L. Schaefer and T. Noam, "Aircraft Turnaround Times for Air Traffic Simulation Analyses," *Transp. Res. Board*, 2003.
- [4] W. J. Coupe, D. Milutinovi, W. Malik, and Y. Jung, "A Data Driven Approach for Characterization of Ramp Area Push Back and Ramp-Taxi Processes," *AIAA Aviat. Technol. Integr. Oper. Conf.*, no. June, pp. 1–15, 2016.
- [5] International Civil Aviation Organization (ICAO), *Annex 14, Volume I: Aerodrome Design and Operations*, vol. I, no. July. 2016, p. 349.
- [6] Federal Aviation Administration (FAA), "Advisory Circular: AC 150/5300-13A: Airport Design," 2014.