

ESTUDIO COMPARADO DE MODELOS DE CAPACIDAD APLICADO AL AEROPUERTO SABE. SITUACIÓN 2013.

Joaquín Piechocki^a, Alejandro Di Bernardi^a y Gabriel Ramírez Díaz^a

^a Grupo de Transporte Aéreo (GTA), Departamento de Aeronáutica, Facultad de Ingeniería,
Universidad Nacional de La Plata
Calle 116 s/n e 47 y 48, (1900) La Plata, Argentina
Email: joaquin.piechocki@ing.unlp.edu.ar

RESUMEN

La determinación de la capacidad de la infraestructura aeronáutica de un aeropuerto es motivo de constante esfuerzo en términos de investigación por cuanto permite, por un lado, establecer políticas de gestión de recursos, materiales y técnicos, y por otro, planificar estratégicamente su evolución. El Aeroparque "Jorge Newbery", SABE de acuerdo a la denominación OACI, es tomado como caso de estudio para el presente estudio en virtud de su importancia en la red de transporte aéreo que integra, y como caso aeroportuario más relevante de ciudades argentinas en términos de movimientos. El presente estudio tiene por objeto la determinación de la capacidad de la infraestructura aeroportuaria de SABE, por medio de tres métodos distintos: aquel definido por la FAA AC5060, uno basado en un método analítico de investigación operativa y la simulación numérica por medio del software SIMMOD. Adicionalmente se comparan los datos de movimiento y demora del aeropuerto en la situación actual con los resultados obtenidos de forma de validar los modelos aplicados. Los resultados de estas determinaciones muestran contrastes basados en los distintos supuestos metodológicos los cuales son comentados, mostrando cierto grado de complementariedad entre los distintos métodos.

ABSTRACT

Determining the capacity of an airport aeronautical infrastructure is a constant effort in terms of research because it allows to establish resource management policies and evolution of strategic plans.

The "Jorge Newbery" airport, designed as SABE by ICAO, is taken as a case study because of its importance in the air transportation system that integrates, and of being the main city airport of Argentina.

The study objective is to determine the ability of airport infrastructure by three different methods: one defined by the FAA AC5060, one based on an analytical method of operations research and numerical simulation through SIMMOD. In addition airport movements were used to validate models.

The results of these measurements show contrasts based on different methodological assumptions which are discussed, showing some degree of complementarity between methods.

Palabras clave: capacidad, investigación operativa, aeropuertos, city airport.

Piechocki, Di Bernardi y Ramírez Díaz - Estudio Comparado de Modelos de Capacidad Aplicado - SABE.

INTRODUCCIÓN

El presente estudio tiene como objeto la estimación de las capacidades prácticas de la infraestructura de la parte aeronáutica del aeropuerto del Aeroparque “Jorge Newbery”, SABE de acuerdo a la denominación OACI.

La determinación de la capacidad de la infraestructura aeronáutica de aeropuertos es motivo de constante esfuerzo en términos de investigación por cuanto permite por un lado establecer políticas de gestión de recursos materiales y técnicos, y por otro, planificar estratégicamente su evolución asociada a una demanda proyectada, en términos de hitos.

Para los fines expuestos se aplica y desarrolla a la parte aeronáutica del aeropuerto las siguientes metodologías: aquella propuesta por FAA en [1], un método de analítico de desarrollo específico (investigación operativa y teoría de colas) y un método de simulación numérica por medio del software SIMMOD.

El método propuesto por Federal Aviation Administration [1] toma como referencia estudios previos, en particular el denominado FAA-RD-74-124, en donde distintos aeropuertos de alta actividad en EUA son estudiados por distintos métodos. Este hecho imprime una primera serie de condicionamientos asociadas a la muestra de la población (de aeropuertos) considerada.

Adicionalmente la configuración aeroportuaria se encuentra tabulada en 19 casos típicos de configuración de pistas, donde existe una calle paralela a lo largo de ella que se conecta con la plataforma y que no presenta problemas de cruces, no presenta limitaciones de espacio aéreo de ningún tipo. Se agrega a estos supuestos un factor de uso del 80% en la condición más favorable de configuración de pista. Sobre la base de estas restricciones el método propone la estimación de capacidades y demoras en aeropuertos por medio de la comparación indirecta con aquellos usados de referencia por medio de gráficos y tablas que estructuran la información.

El método analítico supone establecer una vinculación cinemática de las aeronaves con la infraestructura como fuente causal de interacciones otras aeronaves y la infraestructura, y por tanto de tiempos de servicio. La información que recoge el método contempla procedimientos y condicionamientos en la operación de las aeronaves en el contexto físico, operacional, climático y legal. Esta información también contempla el relevamiento de información experimental, en campo. Finalmente el modelo generado permite establecer capacidades máximas y prácticas a partir de la teoría de colas.

El método que recoge SIMMOD simula la operación de aeronaves sobre una red mimética a la asociada a los movimientos de aeronaves, y establece índices de desempeño de las infraestructuras sobre la base de su utilización en el tiempo. Tiene asociado distribuciones estadísticas que introducen dispersiones operativas que se reflejan en los indicadores. Este método permite caracterizar aeropuertos y demandas específicas.

Existe una importante cantidad de trabajos de investigación sobre la aplicación de SIMMOD para la caracterización de aeropuertos, como por ejemplo el Aeropuerto de Mineapolis, EUA [2]. Adicionalmente esta herramienta de simulación ha demostrado ser capaz de generar información útil para la optimización de operaciones aeroportuarias y la estimación del desempeño [3].

Los índices de capacidad y demoras tienen por objeto el establecimiento de límites prácticos de demanda, el cual tiene asociado una magnitud de demora por operación, que es la máxima permitida para determinado nivel de servicio del sistema. Se denominará a estas capacidades, capacidades prácticas. Trasponiendo el límite de la capacidad práctica, las condiciones de operación suponen demoras que degradan el nivel de servicio al aumentar la demanda, hasta el punto de lo impracticable operativamente, llamado colapso.

Piechocki, Di Bernardi y Ramírez Díaz - Estudio Comparado de Modelos de Capacidad Aplicado - SABE.

En el presente trabajo se compararán los resultados de la evaluación de la infraestructura aeronáutica de SABE por los distintos métodos descritos, incluyendo el sistema de pistas, el sistema de rodajes y el sistema de plataformas comerciales. Este hecho permite evaluar el efecto distintivo y complementario de los distintos enfoques metodológicos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como punto de partida para la evaluación de la capacidad de la parte aeronáutica se toma un espacio aéreo con suficiente capacidad como para hacer despreciables las demoras generadas por él, y por tanto no condicionar la capacidad del sistema.

Al respecto de la calidad de servicio para aeronaves se adopta un valor de demora de 4 minutos por operación, que definirán las distintas capacidades prácticas de la infraestructura del lado aire. Para el cálculo de volúmenes de servicio 4 minutos en promedio suele considerarse un nivel aceptable de demora según FAA AC 150-5070/6.

Demanda aeronáutica y escenarios operativos

El modelo del sistema de la parte aeronáutica de SABE que se adopte depende de los escenarios operacionales que se desarrollen. Estos escenarios reproducirán distintas situaciones de operación del aeropuerto frente a determinado estado del espacio aéreo. La calidad descriptiva de estos escenarios dependerá de la cobertura del universo muestral que represente, y por tanto de las características de la demanda aeronáutica (aeronaves).

Los registros de utilización de pistas arrojan porcentajes de utilización de la infraestructura de la parte aeronáutica en donde el 70% de las operaciones corresponde a aterrizajes y despegues de Pista 13. Se adoptará este escenario a los fines del presente trabajo.

La caracterización de la demanda aeronáutica histórica se usará como base para la demanda actual, a partir de la introducción de índices y factores. Se considerará una hora pico estimada de demanda aeronáutica basada en registros históricos de movimientos.

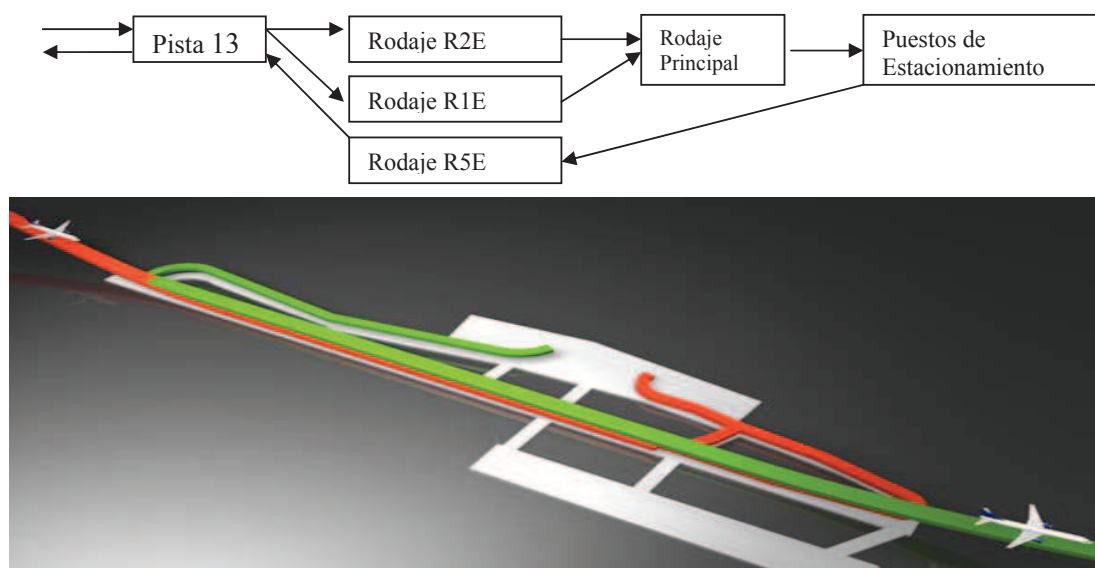


Figura 1 – Esquema de escenario operacional de SABE

Piechocki, Di Bernardi y Ramírez Díaz - Estudio Comparado de Modelos de Capacidad Aplicado - SABE.

En virtud de la predominancia de operaciones comerciales de aeronaves tipo C en horas pico (de acuerdo a la clasificación introducida en [1]) se considera un escenario de diseño dado por una hora pico compuesta por este tipo de aeronaves.

La demanda aeronáutica de pistas estará compuesta por la demanda desde el espacio aéreo tendiente a obtener una ventana espacio-temporal para el aterrizaje en el aeropuerto, y, por otro lado, por aeronaves que buscan despegar e integrarse al espacio aéreo desde el aeropuerto, demandando una ventana espacio-temporal a tal fin.

Los tiempos de separación de aeronaves en despegues y aterrizajes encuentran su origen en la aplicación de criterios de seguridad que imponen un determinado ritmo de operaciones que garantiza la disminución de la energía de vórtices y estelas tras el paso de las aeronaves. El criterio de separación de seguridad adoptada es de 3 millas náuticas.

Para el rodaje en pista para aterrizajes se consideran desaceleraciones máximas en condiciones de un proceso confortable para el pasajero, de $1,98 \text{ m/s}^2$, que se corresponde a una posición intermedia de los sistemas convencionales del denominado *autobrake*. OACI [4] establece una deceleración media mínima de $1,52 \text{ m/s}^2$.

La operación de despegue incluirá el rodaje de entrada a pista desde el ingreso a la zona de seguridad de pista hasta el posicionamiento en cabecera. Esta operación incluirá el frenado total de la aeronave en cabecera, a valores de desaceleración de acuerdo a los mencionados en el caso de aterrizajes. Se considerará un valor típico de 35 s, que incluye una espera de 5 s previo inicio de la aceleración de despegue, el cual se aplicará para todos los casos.

La operación de despegue que se considerará a los fines del cálculo de tiempo de uso de la infraestructura incluirá una aceleración constante, que, en forma conservativa, se asumirá como de 2 m/s^2 en promedio hasta abandonar la pista, superando en el transcurso la maniobra de rotación. La longitud de pista del escenario operativo de uso de pista es de 2.100 m.

El uso de calles de rodaje de salida de pista para los distintos escenarios dependerá de las necesidades operativas de cada aeronave. Para esta evaluación se consideró la información de las aeronaves características para cada categoría provista por sus constructores en sus correspondientes de planificación aeroportuaria.

Las velocidades de rodaje en rectas están sujetas al criterio del piloto, a reglas de operaciones en tierra definidas las aerolíneas y a la normalización que impone el aeropuerto. En particular la situación de rodaje suele estar ajustada para respetar la rampa térmica de enfriamiento de motores que impone 5 minutos de marcha lenta. Se adoptará una velocidad de 30 km/h como valor medio. Para situaciones de rodaje que incluyan cruces de pistas o rodajes se considerará frenado total.

El sistema de plataformas que se considerará contempla la plataforma comercial de pasajeros, la cual consta de 44 puestos de estacionamientos para aeronaves tipo C. El tiempo que se considerará como tiempo de ocupación de puestos será fijará en función de las categorías de las aeronaves. Se adoptará para esta determinación el cómputo del tiempo que tome una aeronave, desde el momento que este ha sido reservado y asignado en rodaje, hasta que quede el puesto de estacionamiento disponible para su reasignación. Los tiempos de ocupación están compuestos por el tiempo de ocupación de registros históricos, procesados de acuerdo con distintos criterios que permitan caracterizar los tiempos de servicio. El objeto de la determinación de tiempos de servicio es la determinación de un valor temporal característico que considere los tiempos operativos para que una aeronave ataque, cambie de carga y sea provisto de los servicios que necesite, y abandone el puesto para el despegue. Se adopta este criterio puesto que los puestos en plataforma deberían operarse de esta manera desde la lógica operativa y económica de la plataforma en un escenario de demanda cercana a la saturación práctica del sistema.

Piechocki, Di Bernardi y Ramírez Díaz - Estudio Comparado de Modelos de Capacidad Aplicado - SABE.

Método AC 150-5060/5

Esta determinación supone que: arribos y partidas se reparten balanceadamente, que el porcentaje de operaciones de *Touch and Go* se encuentra en los límites de lo impuesto por el índice de mezcla, que existe un rodaje paralelo a las pistas consideradas de toda su longitud, suficientes salidas y entradas sin problemas de cruce entre rodajes, que el aeropuerto tiene instrumentación ILS en al menos una pista y tiene los servicios e infraestructura de ATC para llevar adelante operaciones bajo control radar.

Se considerarán para todos los escenarios operativos la utilización exclusiva de operación IFR, siendo esta más conservativa y la más frecuente en la operación de SABE.

El porcentaje de operaciones de aeronaves tipo C y D, deviene a los fines de este proceso en el denominado índice de mezcla [1], cuya fuente son los valores globales históricos. El índice que surge de considerar un 93,56 % de aeronaves tipo C, y un 0,03% de aeronaves tipo D, es de 94%.

Para la configuración de pista y la caracterización de demanda realizada, los índices que se determinan son el porcentaje de arribos al respecto de partidas, del 50%, y la proporción de operaciones de *Touch and Go*, del 0% en la hora pico. Estas hipótesis, en concurrencia con la configuración del sistema de pistas y calles de salida de SABE, determinan de acuerdo al método de referencia una capacidad horaria base de 55 operaciones / hr, y un factor de salida de 0,92. Estos índices dan como resultado una capacidad horaria de pista de 50 operaciones / hr.

Se considerará que la totalidad de los puestos de estacionamiento para aeronaves comerciales deberán ser tipo C. La determinación de la capacidad base se deberán hacer a partir de la utilización de los gráficos de referencia, extrapolados a los tiempos de ocupación determinados para el caso que nos ocupa. La capacidad de la plataforma de pasajeros será el producto entonces de la cantidad de puestos de estacionamiento, 44 unidades, la capacidad base dada por el tiempo de ocupación de 60 minutos, que resulta en un factor 2, y un factor de tamaño, que resulta unitario. La capacidad que surge entonces es de 88 operaciones / hr.

A los fines del cálculo de la capacidad práctica el método aporta gráficos que relacionan la relación demanda / capacidad, con la demora promedio en las operaciones, dependiendo del tipo de mezcla de aeronaves. Este gráfico muestra una notable similitud con la formulación analítica de teoría de colas en cuanto a la morfología de las funciones que expresa. El factor que surge para el caso de estudio es de 0.98. Es posible determinar entonces una capacidad práctica de pistas de 49 operaciones / hr.

La Tabla 1 presenta un resumen de las capacidades determinadas según este método.

Tabla 1 - Resumen de capacidades para SABE según el método FAA AC –150-5060-6

Componente de la infraestructura aeroportuaria	Método FAA AC –150-5060-6	
	Capacidad, op/hr	Capacidad práctica, op/hr
Sistema de Pistas	50	49
Sistema de Rodajes	-	-
Sistema de Plataforma	88	-

Piechocki, Di Bernardi y Ramírez Díaz - Estudio Comparado de Modelos de Capacidad Aplicado - SABE.

Método analítico

La metodología analítica supone analizar la capacidad y las demoras asociadas a las condiciones de operación y demanda de cada uno de los componentes de la denominada parte aeronáutica, y asociarlos en una serie de sistemas de colas y esperas. Específicamente, este análisis se basa en la definición de los siguientes parámetros: patrón de llegada de la demanda, patrón de servicio y capacidad, disciplina de espera, capacidad del sistema, canales de servicio, etapas de servicio. La metodología para la evaluación de demora y capacidad se basa en la llamada teoría de colas, rama de investigación operativa, la cual permite el estudio de líneas de espera permitiendo el análisis de varios procesos interrelacionados.

El análisis de cada componente, pista, sistema de rodaje, plataforma y puestos de estacionamiento, con sus condiciones de operación, resultará en un valor de capacidad teórica de servicio por hora.

Como criterio general, los datos de entrada para los cálculos de capacidad serán todos aquellos procedimientos y condicionamientos en la operación de la aeronave en el contexto físico, operacional, climático y legal.

A los fines del cálculo de la capacidad de la parte aeronáutica del sistema aeroportuaria considerado se calcula la capacidad de cada componente. La capacidad del sistema será la consecuencia del equilibrio operativo de aeronaves en todo el sistema para cada escenario considerado.

Los parámetros en términos operacionales implicados en el cálculo de capacidad son:

- Tiempo de separación entre aterrizajes consecutivos, despegues consecutivos, aterrizajes seguidos de despegues y despegues seguidos de aterrizajes para los distintos tipos de aeronaves (en función de la estela que generan) y condiciones meteorológicas.
- Gestión de las colas de despegue en las operaciones de salida.
- Normas y procedimientos de utilización del sistema de rodaje.
- Normas y procedimientos de utilización del sistema de plataformas.
- Detalle operativo de uso de puestos (remolque, servicios).
- Tiempos de ocupación por puesto.

Los tiempos operativos calculados en función de la cinemática de las operaciones de aeronaves se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2 - Tiempos operativos - Pista 13

Tipo de aeronave	Aterrizajes, s	Despegues, s	Distanciamientos por procedimientos, s	Distanciamientos operativos, s
A/B	83	90	120	173
C	82	90	120	150

Las operaciones seguirán la lógica que sigue. Si el tiempo operativo en aterrizaje de una dada aeronave sumado al tiempo operativo de una dada aeronave en despegue es menor a la separación mínima entre aeronaves en aterrizaje, entonces, es posible intercalar operaciones de despegues entre aterrizajes. En caso contrario, los tiempos operativos sumados contemplarán las separaciones mínimas.

El porcentaje de operaciones C y A/B en despegue obtenidas del registro de movimientos de aterrizaje se lo asimilará a la probabilidad de despegues de aeronaves consecutivas. De esta manera, las probabilidades en despegues consecutivos serán: $P_{CA} = 0,03$, $P_{CC} = 0,97$, $P_{DD} = 0$.

La capacidad de pista será entonces: $C_p = 60 \text{ min} / (0,5 P_{CA} 173 \text{ s} + 0,5 P_{CC} 150 \text{ s}) = 48 \text{ op} / \text{hr}$.

Piechocki, Di Bernardi y Ramírez Díaz - Estudio Comparado de Modelos de Capacidad Aplicado - SABE.

El sistema de rodamientos estará compuesto por los rodamientos de vinculación con la pista, los rodajes paralelos al sistema de pistas, y los rodajes en plataforma. Se considerarán las condiciones operativas de circuitos de rodajes que adoptarán el nombre de los rodajes de vinculación con el sistema de pistas. En particular, para el caso de análisis, pista 13, se considerará entre otros el circuito dado por la salida R1E, su conexión con el rodaje paralelo hasta el entorno del centro geométrico de la plataforma. De esta misma manera se considerará el rodaje R2E y R5E.

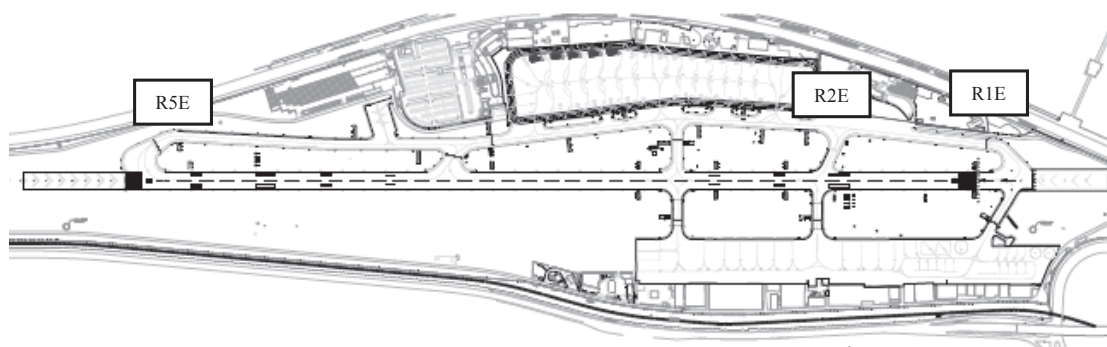


Figura 2 – Esquema del sistema de rodajes de SABE

Los tiempos operativos para la utilización de los rodajes se presentan en la Tabla 3. Estos tiempos de servicio fueron convalidados con mediciones experimentales.

Tabla 3 – Sistema de Rodajes – Capacidad

Denominación de Circuito	Tiempo de desplazamiento, s	Capacidad espacial de alojamiento (canales)	Capacidad, op/hr
R2E	155	3	51
R1E	318	4	79
R5E	321	3	80

La capacidad de plataforma debe contemplarse como la capacidad que esta tiene de proveer puestos de estacionamiento a aeronaves entrantes mientras se hacen disponibles puestos de aeronaves salientes. Esta disponibilidad depende por tanto del tipo de aeronaves entrantes y salientes. Tanto en aterrizajes como en despegues, cada aeronave saliente dejará disponible la capacidad necesaria para una aeronave entrante. Por tanto, la capacidad de la plataforma será la cantidad de puestos para aeronaves para cada tipo de aeronave afectada por el factor de utilización de esa aeronave en el aeropuerto, como se muestra en la Tabla 4. El tiempo de ocupación medio incluye la circulación media en plataforma, la ocupación del puesto, el remolque de salida, y el rodaje de salida de plataforma.

Tabla 4 – Plataforma – Puestos de Estacionamiento – Capacidad

Número de puestos de estacionamiento para aeronaves tipo C	Tiempo de ocupación medio, min	Capacidad, op/hr
44	60	88

La evaluación de la capacidad para 4 minutos de demora da como resultado el valor de las capacidades prácticas.

Piechocki, Di Bernardi y Ramírez Díaz - Estudio Comparado de Modelos de Capacidad Aplicado - SABE.

La construcción de la demanda, la cual condiciona la demora del sistema en un escenario determinado, supone asumir distribuciones de tiempos en la llegada de cada unidad de demanda. De esta manera, se considerarán tiempos entre arribos en aterrizaje con distribución exponencial con media λ , y tiempos de servicio con media μ_i , para cada componente i del sistema. Se supone, por otro lado, que el orden de atención reproduce el orden de llegada en la cola.

Considerando las definiciones realizadas es posible calcular la demora en determinado lapso de tiempo frente a determinada situación de demanda.

Para el análisis del sistema se lo considerará como una red de Jackson. En términos de la espera cada etapa se comporta de modo independiente. La espera total del sistema será la suma de las esperas generadas.

Por otro lado, si se consideran 4 minutos promedio de demora por operación, existirá, en virtud de la distribución estadística asignada (exponencial) a la demanda aeronáutica y al servicio por parte de las infraestructuras, y un nivel de confianza de que las aeronaves no superen un nivel dado de demora por operación, una determinada capacidad de absorber demanda. La capacidad práctica de pista queda definida en este caso como 42 op / hr.

La Tabla 5 resume las capacidades que corresponden a las distintas infraestructuras contempladas en el método mencionado.

Tabla 5 - Resumen de capacidades para SABE según el método analítico

Componente de la infraestructuraaeroportuaria	Método Analítico	
	Capacidad, op/hr	Capacidad práctica, op/hr
Sistema de Pistas	48	42
Rodaje R1E	79	72
Rodaje R2E	51	45
Rodaje R5E	80	74
Sistema de Plataforma	88	82

Simulación Numérica

Para la evaluación de la capacidad práctica del aeropuerto se utilizó el software SIMMOD.

SIMMOD es un modelo de simulación del espacio aéreo y de aeropuertos basada en el análisis de la operatividad sobre la base de escenarios de tráfico. Este software es un modelo de simulación de eventos por pasos que traza el movimiento de aeronaves bajo normas de procedimiento establecidas, en modelos de espacio aéreo y de aeropuerto. Esta herramienta modela la infraestructura aeroportuaria y el espacio aéreo en una estructura rígida de nodos y enlaces por la que se mueven e interactúan las aeronaves). Esta herramienta ha sido utilizada y validada en las últimas décadas a nivel mundial y representa una herramienta consolidada como referencia en el área temática.

En la Figura 3 se presenta un esquema simplificado del modelo del aeropuerto, de acuerdo a las herramientas de modelización geométricas que se disponen a tal fin. La Figura 4 muestra la representación geométrica del aeropuerto en contraste con fotografías aéreas de las zonas de puestos de estacionamiento.

Piechocki, Di Bernardi y Ramírez Díaz - Estudio Comparado de Modelos de Capacidad Aplicado - SABE.

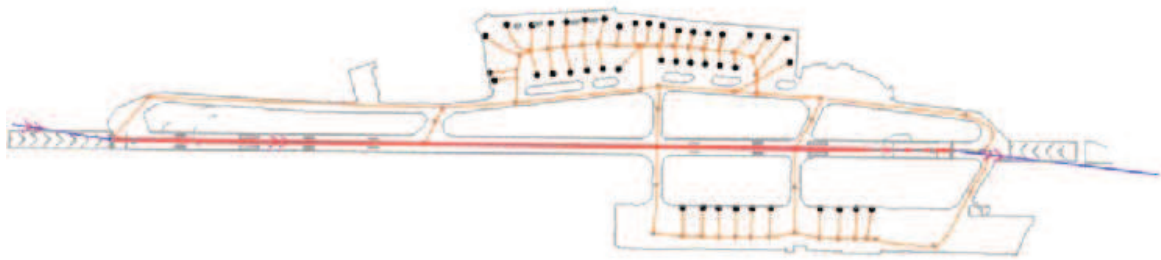


Figura 3 – Esquema del sistema aeroportuario de SABE de acuerdo a las herramientas de modelización de SIMMOD

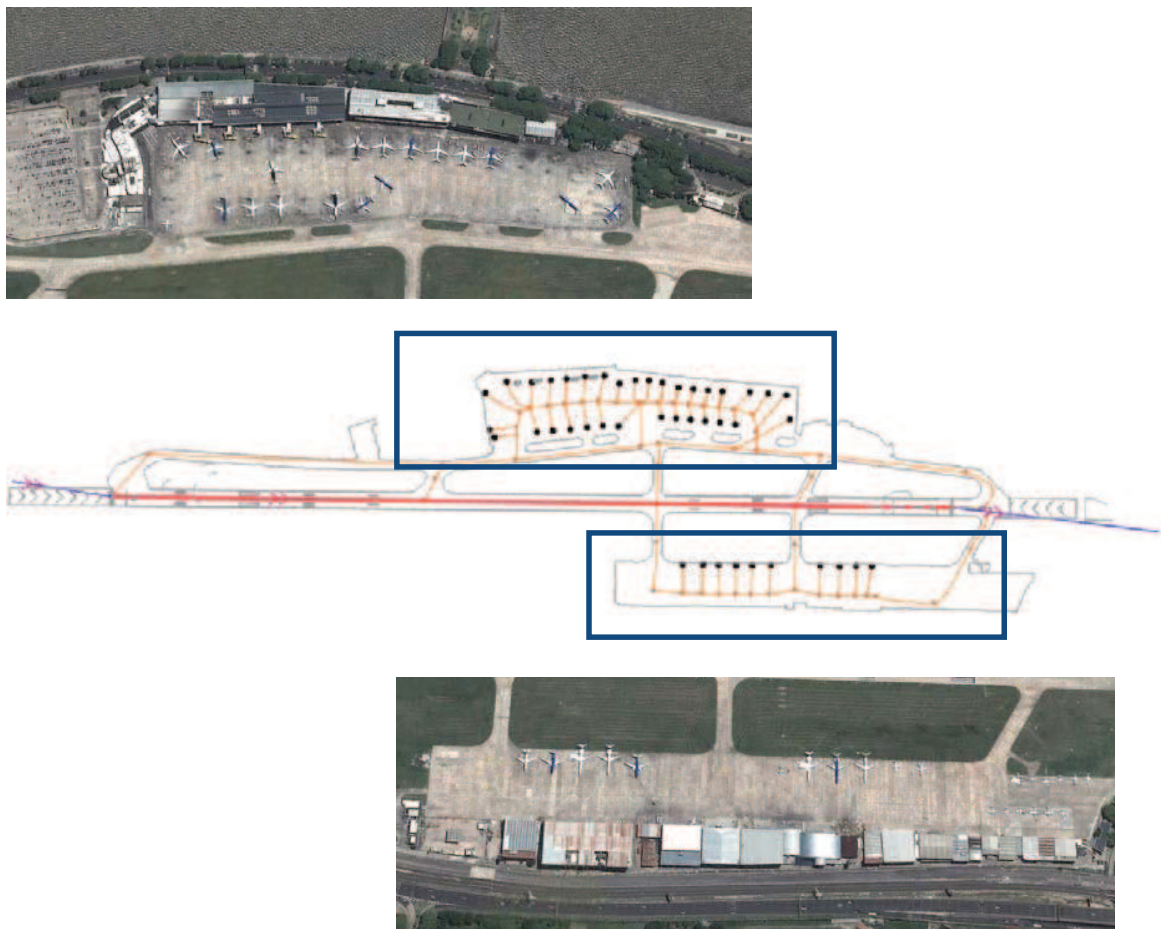


Figura 4 – Detalle de las plataformas del sistema aeroportuario de SABE de acuerdo a las herramientas de modelización de SIMMOD

Los resultados que ofrece la herramienta son consecuencia del cómputo de los eventos que se registran en cada nodo del sistema a lo largo del tiempo.

Las hipótesis adoptadas para la simulación del aeropuerto fueron que las operaciones se realicen exclusivamente por Pista 13 de acuerdo al escenario operativo que se registra en los datos históricos relevados. Se adoptó como tráfico de demanda uno compuesto por aeronaves del tipo Boeing 737, que

Piechocki, Di Bernardi y Ramírez Díaz - Estudio Comparado de Modelos de Capacidad Aplicado - SABE.

puede definirse como típica del aeropuerto, con una distribución de operaciones de aterrizaje y despegue de 50%, sin operaciones de Touch & Go. La separación de las aeronaves en el espacio aéreo modelado respondió a los mínimos adoptados en los anteriores análisis que corresponden a 3 millas náuticas, que responde a prácticas y convenciones de la administración del espacio aéreo del aeropuerto, para el tipo de demanda.

Esta demanda se ordenó de manera de generar un escenario de demanda en una hora de operación, partiendo de un estado de ausencia de demoras, para computar en función del aumento de operaciones la demora promedio por operación.

El modelo del espacio aéreo y de la parte aeronáutica del aeropuerto usado en la simulación responde a la composición de recorridos y normas procedimentales a partir de nodos vinculados a través de las cuales las aeronaves emulan las operaciones aeroportuarias.

La política de uso de la infraestructura aeronáutica adoptada y asignación de recursos no contempló restricciones asociadas a líneas aéreas vinculadas a las operaciones. El tipo de puesto de estacionamiento considerado respondió al tipo de aeronave que compuso la demanda. No se consideraron movimientos de aviación general.

Los arribos se considerados ordenados en una cola de aproximaciones asociados a la ruta del espacio aéreo adoptado. Las salidas se ordenaron en una cola de espera asociada a la cabecera 13 del sistema de pistas.

El método utilizado para la obtención de resultados fue la simulación de distintos escenarios de demanda obteniendo distintas demoras. Esta demanda tuvo como objeto determinar una capacidad dada para un nivel de servicio dado (4 minutos por aeronave) desde una situación inicial de demanda mínima de la infraestructura.

El resultado de las simulaciones arrojó un valor de 43 operaciones para una demora de 4 minutos. Esta limitación estuvo impuesta por la pista. Por otro lado la utilización de puestos de estacionamientos fue menor a la capacidad disponible.

La simulación numérica arroja valores de demora para un determinado escenario operativo, explicitando la demora generada en cada componente, pero estableciendo soluciones de equilibrio basada en las limitaciones del elemento más restrictivo, lo que resulta desde ya esperable. Por esta razón permite evaluar la capacidad de términos de la posibilidad de su utilización en el entorno de la red de vinculaciones que componen el área de movimientos, mostrando equilibrios que manifiestan las capacidades prácticas de la infraestructura más restrictiva.

Los resultados que se obtienen de las simulaciones numéricas se encuentran recogidos en reportes donde se sintetiza información con idéntico origen (el movimiento discreto de cada aeronave por la red de nodos en el transcurso del tiempo) mostrando distintos índices de desempeño de la interacción entre demanda aeronáutica e infraestructura. El objeto del presente trabajo no versa sobre el análisis de estos resultados, sino en el análisis de la denominada capacidad práctica.

Piechocki, Di Bernardi y Ramírez Díaz - Estudio Comparado de Modelos de Capacidad Aplicado - SABE.

CONCLUSIONES

Habiéndose desarrollado tres métodos de evaluación de la capacidad práctica de SABE, se puede ver en la Tabla 6 los resultados arrojados por cada uno de ellos.

Tabla 1 - Resumen de capacidades prácticas para SABE según los métodos utilizados

Infraestructura	Método AC 150-5060/5	Método Analítico	Simulación Numérica
Sistemas de Pistas	49 ops/h	42 ops/h	43 ops/h
Rodaje R1E	-	72 ops/h	-
Rodaje R2E	-	45 ops/h	-
Rodaje R5E	-	74 ops/h	-
Sistema de Plataforma	-	82 ops/h	-

Se puede observar que existe correspondencia entre los valores que se obtuvieron por los distintos métodos. El método analítico, conjuntamente con la simulación numérica, arroja valores más conservativos que el método AC 150-5060/5.

También puede observarse que el esfuerzo para la aplicación del modelo es creciente para los tres modelos desarrollados, a saber método AC 150-5060/5, método analítico, y simulación numérica. El nivel de especificidad de la estimación también va en aumento en el mismo sentido.

Puede verse que el método analítico permite determinar de forma rápida capacidades prácticas de cada infraestructura asociada a la operación de las aeronaves, de manera de hacer posible la estimación de conflictos en la operatividad. Este hecho es consecuencia de la posibilidad de comparar cada infraestructura separadamente en términos de capacidad, pudiendo establecerse distintos escenarios de restricción operativa en función de la ampliación de las distintas infraestructuras.

La simulación numérica permite obtener el resultado de operaciones sucesivas específicas, obteniendo como resultado una diversidad de índices que caracterizan la infraestructura y permiten la planificación estratégica. Esta herramienta es esencial para la optimización de las operaciones aeroportuarias, por cuanto permite medir el efecto causal de las variantes operativas. No obstante, la capacidad práctica que arroja el modelo es idéntica a aquella que arroja el modelo analítico. En particular, en el caso que se analiza, Aeropuerto SABE, esta capacidad práctica se encuentra definida por la capacidad de la pista de absorber operaciones aeronáuticas con despegues y aterrizajes consecutivos intercalados. Esta capacidad, a su vez, se encuentra definida por la relación entre la separación entre aeronaves en el espacio aéreo (considerada en este caso como 3 millas náuticas) y el tiempo de la operación de despegue. En cualquiera de los dos modelos se considera idéntica situación operativa, lo cual hace esperable el resultado.

El método tabulado en AC 150-5060/5 supone condiciones de operación predefinidas, sobre la base de información extraída de una población estadística que corresponde EUA en determinada época. Por tanto supone ciertas variables implícitas, que no necesariamente son aplicables cualquier aeropuerto.

En cualquier caso representa una herramienta formidable de estimación en primer término, por cuanto las variaciones referidas corresponden a ajustes de segundo orden de magnitud.

Se puede concluir que los tres métodos expuestos son complementarios. Permiten la caracterización gradual de la infraestructura aeroportuaria, con escalas de esfuerzos graduales.

Piechocki, Di Bernardi y Ramírez Díaz - Estudio Comparado de Modelos de Capacidad Aplicado - SABE.

Al respecto de la capacidad práctica del Aeropuerto SABE este corresponde al orden de 42 operaciones hora, para aeronaves del tipo Boeing 737, lo cual supone un límite que sólo puede transponerse generando una degradación del servicio que impactarán en la demora acumulada de las operaciones.

REFERENCIAS

- [1] AC 150-5060-6. Federal Aviation Administration, EUA.
- [2] St. Paul International Airport. "MSP Airfield Simulation Analysis Technical Report. Minneapolis". HNTB, EUA, 2011.
- [3] Fricke H., Schultz M. "Delay Impacts onto Tunaround Performance. Optimal Time Buffering for Minimizing Delay Propagation. USA/Europe Air Traffica Management Research and Development Seminar. 2009.
- [4] ICAO. "Manual de Proyecto Aeródromo – Calles de Rodaje, plataforma y apartaderos de espera" Doc 9157-AN/901, 2013.