



Cálculo de capacidad de pista, Método analítico.

Alejandro M. Miguel^{a}, Eduardo Carceglia^a, Carlos Varrenti^a.*

^a Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Haedo, Haedo (1706), Buenos Aires, Argentina.

**Alejandro M. Miguel, alemiguel93@gmail.com.*

ABSTRACT

Since the beginning of 1980 and due to the growth of the aeronautical activity, the capacity evaluation of the airport and in particular, the "Runway Capacity" has become an essential analysis for the development of any Airport with a high rate of operations. The following work aims to introduce the calculation of the Runway capacity through the "Analytical method", this Report presents its scope, applications and verify the model calculations with results presented by the FAA of the George Bush Intercontinental Airport (IAH).

Keywords: Capacity, Airports, Airside, Analytical Model.

RESUMEN

Desde los inicios de 1980 y debido al gran crecimiento de la actividad aeronáutica, evaluar la capacidad del aeropuerto y en especial, la "Capacidad de pista" se ha convertido en un análisis esencial para el desarrollo de cualquier Aeródromo/Aeropuerto con una alta tasa de operaciones. El siguiente trabajo tiene como objetivo introducir el cálculo de capacidad de pista mediante el "Método analítico", presentar sus alcances, aplicaciones y verificar el modelo de cálculo con los resultados presentados por la FAA del Aeropuerto intercontinental George Bush (IAH).

Palabras Clave: Capacidad, Aeropuertos, Lado Aire, Método Analítico.

1. Introducción

Desde los inicios de 1980 y debido al gran crecimiento de la actividad aeronáutica, aeropuertos de Estados Unidos y Europa comenzaron a afrontar dificultades para manejar los altos niveles de demanda incurriendo en problemas de tráfico aéreo, espacio físico y demoras considerables. A través de los tiempos, diversos métodos y modelos se han desarrollado para estimar la capacidad del espacio aéreo y terrestre de los aeropuertos.

Uno de los análisis de mayor importancia al diseñar un aeródromo es el análisis de la capacidad de pista, el cual tiene como fin estimar la cantidad de operaciones (*Despegues y aterrizajes*) que pueden ser realizadas en un sistema de pistas bajo un marco determinado de operación. Los requerimientos de OACI y la necesidad de cumplir con un coeficiente de utilización no menor al 95% para un sistema de pistas, exigen que la capacidad y el diseño se adecúen a la demanda existente. La capacidad de pista provee de información esencial no solo al aeropuerto sino también a operadores aéreos, pudiendo estimar las demoras que puedan llegar a ocasionarse debido a los altos niveles de demanda.

Entre los métodos y modelos generalmente utilizados para estimar las operaciones de pista, se encuentra el "Método Analítico". Este es un modelo discreto basado en el concepto Espacio-Tiempo y la ponderación de sucesos, que tiene como objetivo estimar de manera gráfica la *Capacidad Última o de Saturación*, a la cual está sometido un sistema de pistas, bajo un marco determinado de operaciones y demanda. Este trabajo tiene como objetivo introducir el "Método analítico", sus alcances, aplicaciones y verificar el modelo de cálculo con los resultados presentados por la FAA del Aeropuerto intercontinental George Bush (IAH).



2. Método analítico

Es importante antes de continuar, definir dos conceptos que serán de utilidad para entender el método:

- *Capacidad práctica*: tasa de operaciones que un aeropuerto puede aceptar considerando una demora tolerable.
- *Capacidad última o de Saturación*: tasa máxima de operaciones que un aeropuerto puede gestionar bajo condiciones de demanda continua, sin considerar la demora ocasionada.

El método presentado tiene como objetivo obtener los puntos necesarios para trazar el diagrama de Pareto, o también conocido como envolvente de capacidad, y establecer el estado de saturación del aeropuerto analizado considerando un determinado marco de operaciones. Comúnmente es posible encontrar envolventes de capacidad como los de la Fig. 1. Como se puede apreciar, los límites de la envolvente representan la capacidad *Última o de Saturación* a la cual está expuesto nuestro aeródromo. Este modelo indica de manera gráfica los límites a partir de los cuales, las operaciones de un aeropuerto incurren en una alta tasa de demoras considerables debido a la saturación del espacio aéreo.

En su forma más general pueden apreciarse cuatro puntos esenciales, aunque es posible encontrar graficas con puntos auxiliares, los cuales manifiestan un modo de operación particular que se requiere analizar. Si se cuenta con información diaria de las operaciones, es posible volcar dicha información en la envolvente estimada, como se muestra en la Fig. 2, y de esta manera establecer el estado de saturación de un aeródromo en funcionamiento. Este análisis gráfico permite de manera rápida y sin incurrir en importantes errores, monitorear la saturación del aeropuerto durante la fase de operación. El método analítico y sus gráficas, han sido una herramienta de divulgación de gran interés y útil para diversos operadores aéreos, se ha transformado en una herramienta sencilla de evaluación de la saturación del espacio aéreo, pudiendo obtenerse un primer análisis de las demoras que podrían incurrir en las operaciones.

El método analítico limita su análisis al sistema de pista, su senda de aproximación y calles de salida. Este modelo se caracteriza por:

- Analizar el estado de saturación considerando una demanda continua e ininterrumpida de operaciones.
- Ser sencillo, rápido de ejecutar y **ECÓNOMICO**.
- Suficiente para la planificación preliminar de un aeropuerto / espacio aéreo y seguimiento.
- Presentar resultados gráficos y analíticos para su análisis.
- Presentar estimaciones con un error de alrededor del 10% en relación a los modelos continuos, pero son apropiados para el análisis.
- Posibilidad de adaptar el cálculo de capacidad a un Mix particular de aeronaves al cual que se escoja el aeropuerto.
- Ser el modelo primario de estimación como antesala a los modelos continuos (Simulaciones).

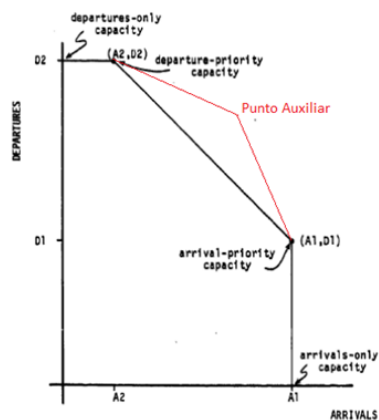


Figura 1 - Modelo de envolvente de capacidad.

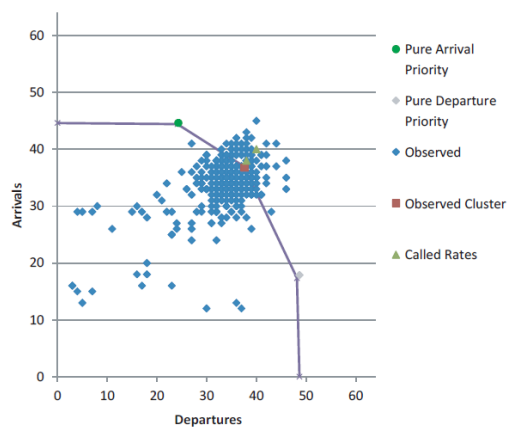


Figura 2 - Análisis gráfico de saturación.

2.1. Diagramas Espacio-Tiempo

El modelo se basa esencialmente en la información obtenida a partir de diagramas de Espacio-Tiempo. Un caso particular de análisis, es el de una pista destinada exclusivamente a arribos [1], la cual se encuentra bajo una demanda continua e ininterrumpida de operaciones en donde se pueden apreciar dos situaciones como los de la Fig. 3 y 4.

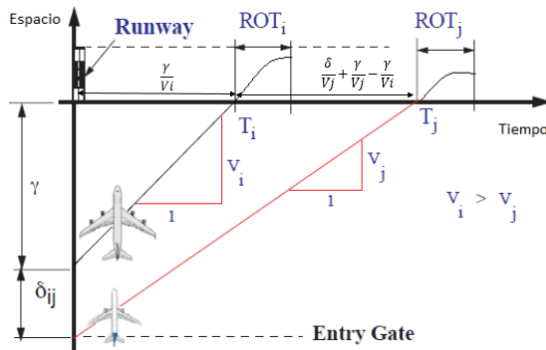


Figura 3 - Aproximacion con $V_i > V_j$.

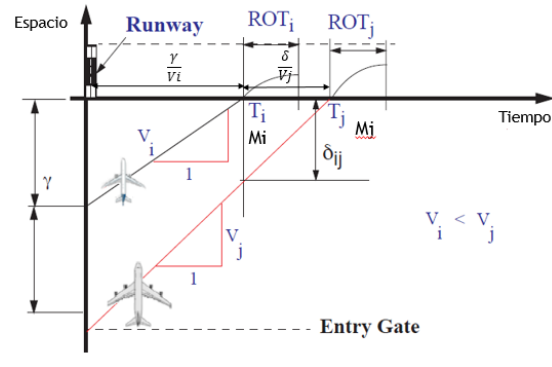


Figura 4 - Intervalo entre arribos $V_i \leq V_j$.

Consideramos las figuras anteriores, podemos establecer un tiempo entre arribos (T_{ij}) que estará definido por (1) y (2).

$$T_{ij} = \frac{\delta_{ij}}{V_j} + \gamma \left(\frac{1}{V_j} - \frac{1}{V_i} \right) + tb \quad (1)$$

$$T_{ij} = \frac{\delta_{ij}}{V_j} + tb \quad (2)$$

Donde V es la velocidad de aproximación y se aplica (1) si $V_i > V_j$ o se hace uso de (2) si $V_i \leq V_j$; i, j es el índice de la categoría de la aeronave primaria (i) y la categoría secundaria (j) en una aproximación considerando una secuencia (ij); δ_{ij} es la separación entre aeronaves ij ; T_{ij} es el tiempo entre arribos de una aeronave (i) seguida de una aeronave (j).

“ tb ” es un tiempo adicional de separación agregado por el controlado en donde se aplica (3) si $V_i \leq V_j$ o se hace uso de (4) si $V_i > V_j$.

$$tb = \sigma * q(pv) \quad (3)$$

$$tb = \sigma * q(pv) + \delta_{ij} \left(\frac{1}{V_j} - \frac{1}{V_i} \right) \quad (4)$$

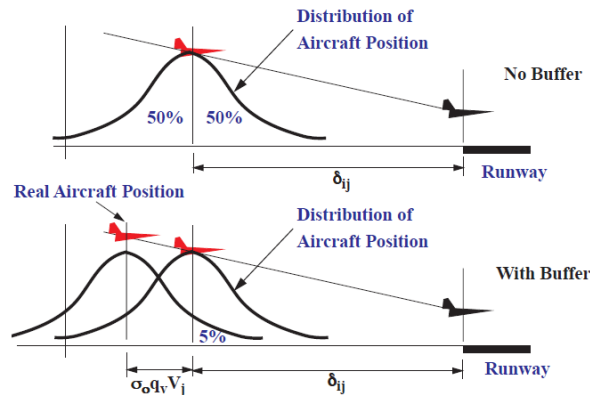


Figura 5 -Errores normalmente distribuidos de la posición de la aeronave.



El tiempo adicional considera errores normalmente distribuidos de la posición de la aeronave durante la fase de aproximación, los cuales tienen inherencia en los tiempos entre arribos. En (3) y (4) el valor σ representa la desviación estándar del error de posición de la aeronave. pv representa la probabilidad de violación de las reglas mínimas aceptables de separaciones, mientras que $q(pv)$ es el valor para el cual la distribución normal acumulativa toma el valor $(1 - pv)$.

Si ponderamos el tiempo entre arribos por una probabilidad de ocurrencia P_{ij} en el mix de aterrizajes; se establece que el tiempo promedio ponderado entre arribos es:

$$E(t) = \sum_i \sum_j T_{ij} * P_{ij} \quad (5)$$

Considerando el tiempo entre arribos $E(t)$, es posible obtener la capacidad para una pista destinada exclusivamente a operaciones de arribos como (6), la cual estará expresada en operaciones por unidad de tiempo.

$$Ca = \frac{1}{E(t)} \quad (6)$$

De esta manera es posible obtener el punto de la envolvente correspondiente a *Arrivals-Arrivals* (Eje coordinado) y siguiendo con el mismo lineamiento, es posible obtener el punto correspondiente a *Departures- Departures* (Pista destinada exclusivamente a operaciones de Despegues). En el caso de considerar una pista con operaciones mixtas [1,2], si se analiza el caso de insertar operaciones de despegues entre arribos, se deberá considerar el tiempo necesario para estas operaciones, por lo cual deberá cumplirse (7).

$$T_{ij} > Gaps \quad (7)$$

Donde *Gaps*, es el espacio requerido para realizar “n” despegues, y este deberá ser menor al tiempo entre arribos T_{ij} . Siendo “n”, la cantidad de despegues que se deseen analizar (Fig. 5). Este mismo razonamiento se aplica en caso de analizar los espacios requeridos para realizar operaciones de arribos entre despegues.

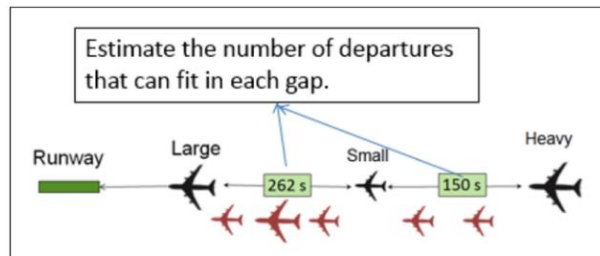


Figura 5 - Estimacion de despegues entre arribos.

Analizando el espacio mínimo requerido para relizar un despegue entre arribos, se recurre a la fórmula (8) donde se debe cumplir:

$$T_{ij} \geq E(Rot)_i + E\left(\frac{\delta}{V_j}\right) + \varepsilon(t) + (n - 1) * E(Td) \quad (8)$$

Donde T_{ij} es el Tiempo necesarios entre arribos/Despegues, $E(\delta/V_j)$: Tiempo promedio ponderado de aproximación del mix de aeronaves considerando la mínima separación (2NM) para permitir un despegue, $E(Rot)_i$ tiempo promedio Ponderado de ocupación de pista. $\varepsilon(t)$, tiempo de Buffer añadido por el controlador y $(n-1)*E(Td)$, el tiempo requerido para permitir más de un despegue sucesivo donde $E(Td)$ lo consideramos como el tiempo promedio ponderado entre despegues, el mismo se obtiene utilizando la misma lógica de la fórmula (5).



2.2. Requerimientos del modelo

Para poder aplicar el modelo es necesario contar con la información de las referencias [2,3]:

- Mix de aeronaves (Grupos de aeronaves de características similares).
- Plano de pista.
- Velocidades de aproximación de las aeronaves (V).
- Longitud de senda de aproximación (Y).
- Tiempo de ocupación de pista en arribos ($ROTi$).
- Tiempo de ocupación de pista en Despegues ($DROTi$).
- Meteorología.
- Separaciones entre arribos (δ).
- Separaciones entre salidas (td).
- Separación mínima entre despegue y aterrizaje (δ_{AD}).
- Radar.
- Capacidad de control del ATC.
- Desviación estándar por error de posición de las aeronaves (σ).

Esta información puede obtenerse u estimarse considerando las normas de operación del espacio aéreo, estadísticas, métodos empíricos y/o simulaciones. Es fundamental poder obtener datos precisos que se aproximen a la normal operación del aeródromo, de manera tal de poder obtener un modelo que sea fiel a la realidad.

3. Aplicación del Método

Como caso de aplicación, se presenta el siguiente análisis que tiene como finalidad estimar la capacidad de pista del Aeropuerto intercontinental George Bush (IAH) bajo condiciones IMC mediante el Método analítico, y compararla con los datos de Benchmark [4] y estimaciones obtenidas por la FAA del año 2014 [5]. La Fig. 6 detalla las operaciones de pista (Verde aterrizajes, rojo despegues), mientras que la Fig. 7 presenta la envolvente presentada en el informe de Benchmark.

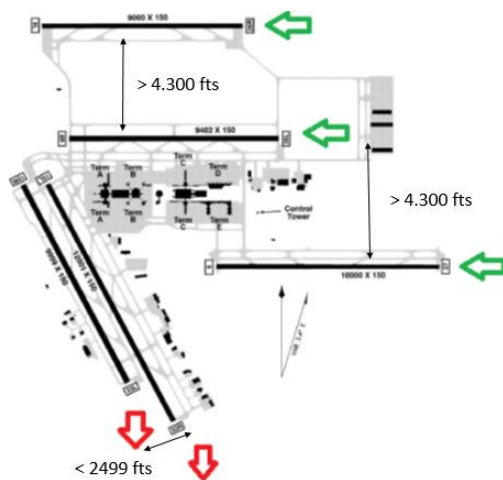


Figura 6 - Operaciones de pista IAH.

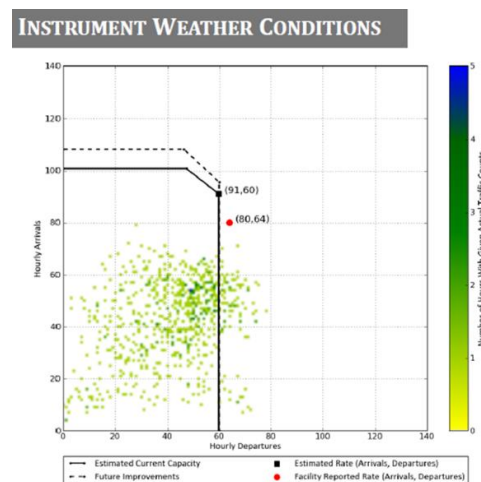


Figura 7 - Envolvente de capacidad IAH.

Considerando los modos de operación del Aeropuerto George Bush, las separaciones entre ejes de pistas destinadas a arribos, permiten que las operaciones se lleven a cabo de manera independiente entre sí permitiendo arribos simultáneos. Bajo esta consideración es posible evaluar la capacidad de pista destinada exclusivamente a arribos, evaluando una única pista y extendiendo su análisis a las demás. Las pistas destinadas a despegues, posee una separación entre ejes de pista menor a 2499 fts, por lo cual dicho sistema se comporta como una pista única, en donde se deben mantener separaciones mínimas entre despegues reglamentarias [3].



Analizando las cartas de aproximación, podemos considerar por similitud que las sendas de aproximación tendrán una longitud de 6 NM.

3.1. Metodología de cálculo y resultados.

Como herramienta para la aplicación del método, se hace uso de una planilla de cálculo presentada en la Fig. 8, la cual cuenta con los algoritmos matemáticos requeridos, los parámetros a ingresar (Inputs) y las gráficas que se desean obtener en conjunto con resultados numéricos.

Programar los algoritmos, Inputs y gráficas, permite al usuario poder verificar los cálculos, modificar parámetros y comparar envoltentes de diversos escenarios y configuraciones de operación.

Esta herramienta permite obtener envoltentes para configuraciones de:

- Pista única.
- Pistas paralelas con operaciones segregadas.
- Pistas paralelas independientes.

Estas configuraciones contemplan operaciones de despegues, arribos u operaciones mixtas. Como parámetros a ingresar en la planilla, se considerarán las características estándares de operación de la Fig. 9 bajo condiciones IMC (Instrument Meteorological Conditions). Para analizar el Mix de aeronaves, se propone agrupar las aeronaves en función a la categoría de *Pesos máximo de despegue* [6]. Basándonos en las operaciones del aeropuerto y el mix [5], se estima que las operaciones podrían caracterizarse con la información proporcionada en la Tabla 1. Las velocidades de aproximación (Average Approach Speeds) fueron tomadas de la referencia [7], considerando viento en calma, en donde la GS (Ground Speed) coincide con la Average Approach Speed.

Haciendo uso de las normas de operación CAA y FAA [8-11], las separaciones entre arribos (δ) durante la fase de aproximación y las separaciones entre despegues (td), se pueden resumir en las Tablas 2 y 3.

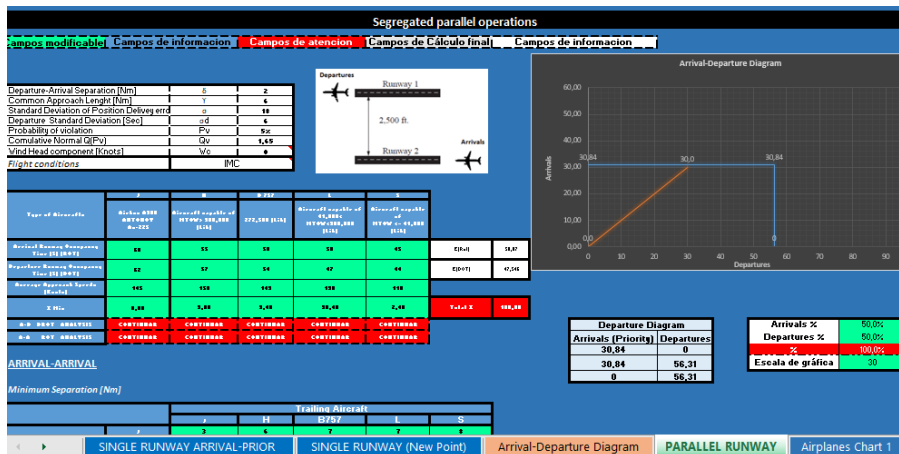


Figura 8 - Captura de pantalla de la planilla utilizada.

Departure-Arrival Separation [Nm]	δ	2
Common Approach Length [Nm]	γ	6
Standard Deviation of Position Delivery error [Sec]	σ	18
Departure Standard Deviation [Sec]	σ_d	6
Probability of violation	P_v	5%
Cumulative Normal Q(Pv)	Q_v	1,65
Wind Head component [Knots]	W_c	0
Flight conditions		IMC

Figura 9 - Captura de pantalla de los pámetros ingresado para el cálculo.



Tabla 1 – Parámetros característicos del Mix.

Aircrafts/ Performance	Super (J)	Heavy (H)	B757	Large (L)	Small (S)
Arrival Runway Occupancy Time [S] (ROT)	60	55	50	50	45
Average Approach Speeds [Knots]	145	150	143	130	110
Approach Ground Speed [Knots]	145	150	143	130	110
% Mix	0,00	3,80	3,40	90,40	2,40

Tabla 2 – Separaciones entre arribos [Nm].

Leading Aircrafts/ Trailing Aircraft	Super (J)	Heavy (H)	B757	Large (L)	Small (S)
Super (J)	3	6	7	7	8
Heavy (H)	3	4	4	5	6
B757	3	4	4	4	5
Large (L)	3	3	3	3	4
Small (S)	3	3	3	3	3

Tabla 3 – Separaciones entre Despegues [Seg].

Leading Aircrafts/ Trailing Aircraft	Super (J)	Heavy (H)	B757	Large (L)	Small (S)
Super (J)	60	120	180	180	180
Heavy (H)	60	90	120	120	120
B757	60	90	90	90	120
Large (L)	60	60	60	60	90
Small (S)	60	60	60	60	60

3.2. Resultados

Considerando los datos de entrada descriptos, como resultado del análisis y los cálculos realizados se obtiene los datos presentados en la Tabla 4 y la Fig. 10.

Tabla 4 – Resultados obtenidos por pista.

RWAY Op.	Por Pista [OP/h]	Nº de Pistas [OP/h]	Total [OP/h]
Arrivals	30.84	3	92.52
Departures	56.31	1	56.31

A raíz de los resultados de la Tabla 4, se obtienen aproximadamente 30.84 operaciones para una pista destinada exclusivamente a arribos, mientras que para las pistas destinadas a despegues (Consideradas como pista única) se obtienen 56.31 operaciones. Como condición inicial de este estudio, se estima que el análisis de una pista destinada exclusivamente a arribos podía extenderse a las demás dado su independencia, por lo cual se puede determinar de manera simple que las operaciones para el sistema de pistas destinada a arribos son de 92.52 operaciones horarias. Analizando la envolvente de capacidad obtenida, se observa que la capacidad máxima para el sistema de pistas propuesto es de aproximadamente 148 operaciones por hora.

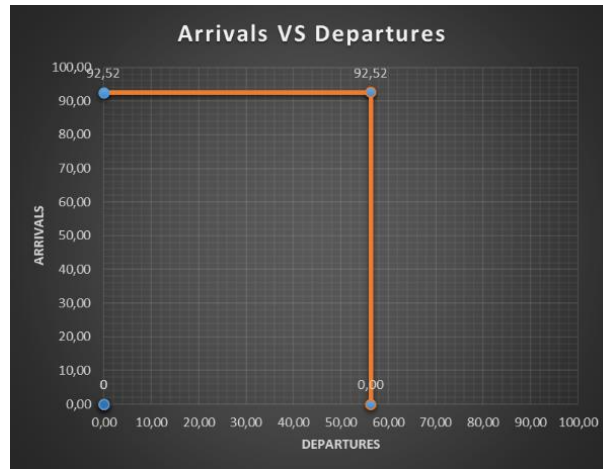


Figura 10 - Envoltente de capacidad calculada.

4. Conclusiones

Considerando los resultados obtenidos por el método desarrollado y las estimaciones reportadas por la FAA, la Tabla 5 establece una comparativa de valores de capacidad para las pistas destinadas a arribos y partidas.

Tabla 5 – Parámetros característicos de aeronaves.

RWAY	Resultados [OP/h]	FAA [OP/h]	Diferencia %
Arrivals	92,52	91	1,67
Departures	56,31	60	6,15

Se observa que los resultados obtenidos difieren en menor porcentaje a los valores del reporte, verificando que las estimaciones realizadas con este método son válidas para obtener la envoltente de capacidad y evaluar el estado de saturación del aeropuerto. Analizando los resultados, existe una diferencia de un 6,15% entre los valores de capacidad de las pistas destinadas al despegue, lo cual se debe a que los tiempos entre despegues estimados, no son necesariamente coincidentes con los aplicado en Houston.

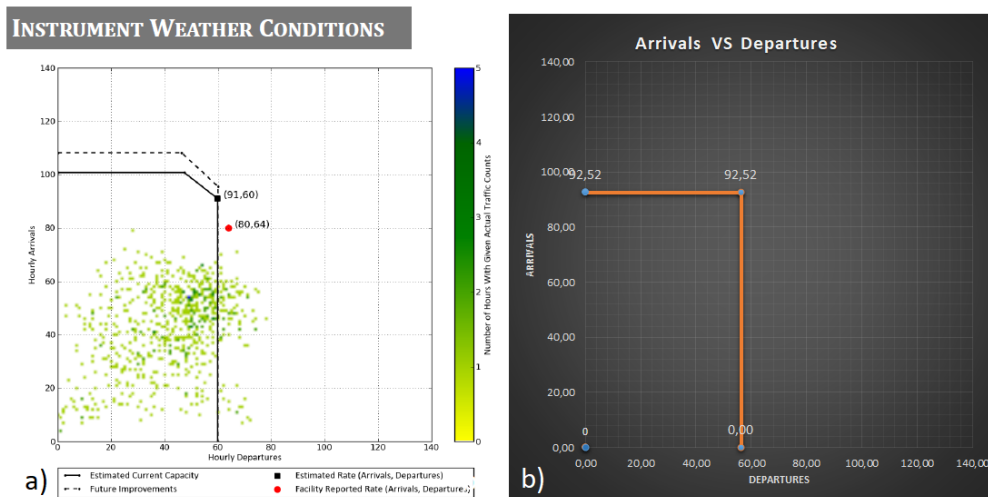


Figura 11 - a) Envoltente FAA; b) Envoltente estimada.



En la Fig. 11 puede encontrarse que las envolventes de capacidad no coinciden exactamente en su forma, por lo que se deduce que existe una configuración de pista evaluada por la FAA adicional a la declarada en el reporte, que no se ha considerado en el corriente análisis. Como conclusión final se aprecia que la evaluación y las estimaciones realizadas, son congruente con los análisis del reporte de capacidad presentado por la FAA, pudiendo verificarse y aplicarse este modelo a pistas con operaciones y configuración similar.

Agradecimientos

Mi más profundo agradecimiento al Ing. Aero. Eduardo Carceglia y al Ing. Aero. Carlos Varrenti por haber participado y colaborado en este informe.

Referencias

- [1] Norman J. Ashford, Saleh Mumayiz, Paul H. Wright “Airport, Engineering Planning, Design, and Development of 21st Century Airports”, Fourth Edition, JOHN WILEY & SONS, INC, USA (2011).
- [2] William J. Swedish, “Upgraded FAA Airfield Capacity Model Volume 1: Supplemental User's Guide, Virginia”, U.S.A. The MITRE Corporation (1981).
- [3] Airport Cooperative Research Program, “ACRP REPORT 79, Evaluating Airfield Capacity”, Leigh Fisher, Burlingame, CA, (2011).
- [4] Federal Aviation Administration Operational Analysis Guidance Document, “Operational Analysis Guidance Document, Version 1.0, U.S.A, March 2012. (2012).
- [5] Jennifer Gentry, Kent Duffy, William J. Swedish, “FAA Airport Capacity Profiles”, MITRE Corporation, Center for Advanced Aviation System Development, McLean VA 22102-7539 May 2014, (2014). [Online]. Available: https://www.faa.gov/airports/planning_capacity/profiles/media/IAH-Airport-Capacity-Profile-2014.pdf. [Accessed: Feb 25, 2019].
- [6] Sharon Kurywchak, “ORDER JO 7360.1D Aircraft Type Designators”, U.S Department of Transportation Federal Aviation Administration (2018).
- [7] Advisory Circular, AC No: AC 150/5300-13A, Airport Design, Federal Aviation Administration, U.S.A. February 2014 [Online]. Available: https://www.faa.gov/airports/engineering/aircraft_char_database/. [Accessed: Feb 25, 2019].
- [8] CAA, Aeronautical Information Circular P 001/2015 Wake Turbulence, CAA, NATS Services, UK Aeronautical Information Services, Heathrow, UK, 22 January 2015 (2015).
- [9] Craig Guensch, Marshall Koch, Collin Schaffer, Clark Lunsford, “RECAT Phase 2 - Approach to Airport Specific Benefits”, The MITRE Corporation, (2012).
- [10] Sebastian Timar and Mark Peters, “Advanced Interval Management: A Benefit Analysis”, Saab Sensis Corporation, Campbell, California, NASA/CR-2016-219327, august 2016, (2016).
- [11] Advisory Circular, AC No: 90-23G, “Aircraft Wake Turbulence”, U.S Department of Transportation Federal Aviation Administration, February. (2014).