



SAM/IG/2  
NE/16  
10/10/08

**Organización de Aviación Civil Internacional  
Oficina Regional Sudamericana**

**SEGUNDO TALLER/REUNIÓN DEL GRUPO DE IMPLANTACIÓN SAM (SAM/IG/2)  
PROYECTO REGIONAL RLA/06/901**

**Lima, Perú, 3 al 7 de noviembre de 2008**

**Cuestión 4 del  
Orden del Día:            Implantación de la gestión de afluencia del tránsito aéreo (ATFM) en la  
   Región SAM**

**METODOLOGÍA UTILIZADA POR BRASIL PARA EL CÁLCULO DE CAPACIDAD DE  
PISTA**

(Presentada por CGNA-Centro de Gestión de la Navegación Aérea de Brasil)

<b>Resumen</b>
Esta nota de estudio tiene por objeto presentar a la OACI la metodología adoptada por Brasil para el cálculo de capacidad de pista.
<b>Referencia:</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Doc 8168 – OACI – Operación de Aeronaves.</li></ul>

**1                    Introducción**

1.1        La saturación de la capacidad de operación de las pistas de aterrizaje y despegue ha sido uno de los más grandes problemas de los aeropuertos nacionales e internacionales. Con el objetivo de mantener el flujo de tránsito aéreo, próximo a las condiciones óptimas, evitando posibles sobrecargas en el sistema, el CGNA desarrolló procedimientos para tipificar el cálculo de capacidad de pista, con el objetivo de seguir la evolución de la demanda/capacidad de cada aeropuerto, encontrando, de esta

manera, subsidios que permitan emitir recomendaciones previas a los aeropuertos de interés, con la finalidad de mantener la operacionalidad en armonía.

De acuerdo a la evolución del tránsito en los aeropuertos, el cálculo de la capacidad de pista tomará en cuenta no solamente el tiempo de ocupación de pista, sino también otros parámetros que interfieren significativamente en la capacidad de operación de la pista.

1.2 Para la determinación de la capacidad del conjunto de pistas, los siguientes factores son considerados:

- a) factores de planificación; y
- b) factores relativos a las operaciones de aterrizaje y despegue.

#### 1.2.1 Factores de Planificación

Los factores de planificación son elementos utilizados para simplificar los modelos matemáticos, o de los aspectos operacionales, que influyen en la determinación de la capacidad de pista. Los más comunes son:

- a) Condiciones optimas de encadenamiento de aeronaves y coordinación de tránsito aéreo;
- b) Todos los equipos operacionales son considerados con la misma capacidad y mismo desempeño operacional; y
- c) Todos los equipos de radio-navegación y de auxilios visuales son considerados, técnica y operacionalmente, sin restricciones; y todos los equipos de comunicaciones (VHF/telefonía) son considerados operacionales.

#### 1.2.2 Factores Relativos a las Operaciones de Aterrizaje y Despegue

- a) Tiempo medios de ocupación de pista;
- b) Mix de aeronaves;
- c) Porcentual de utilización de los umbrales;
- d) Largo del segmento de aproximación final;
- e) Separación mínima reglamentada de las aeronaves;
- f) Configuración de las pistas de aterrizaje y calles de rodaje; y
- g) Velocidad de aproximación final.

## 2 **Análisis**

En seguida será realizada una descripción del modelo matemático del cálculo de la capacidad teórica de pista utilizado por el DECEA. En algunos pasos, es utilizada la clasificación de aeronaves, por categorías (de **A** hasta **E**), de acuerdo con el Doc 8168 (table iii-1-2).

### 2.1 **MODELO MATEMÁTICO DE LA CAPACIDAD TEÓRICA DE PISTA**

#### **1º PASO**

##### **COLECTA DE DATOS DEL AEROPUERTO:**

1º) Tiempo de ocupación de pista en el despegue (TOPD): tiempo utilizado por la aeronave durante la operación de despegue, o sea, el tiempo contado a partir del momento en que la aeronave abandona el punto de espera, hasta el cruce del umbral opuesto;

2º) Tiempo de ocupación de pista en el aterrizaje (TOPP): tiempo utilizado a partir del punto en que la aeronave cruza el umbral de la pista, hasta el momento en que la misma tenga abandonado la pista, en la operación de aterrizaje; y

3º) Tiempo de vuelo desde el marcador externo (o FAF) hasta el umbral de la pista (T): tiempo utilizado por la aeronave durante la fase de aproximación final, desde del momento en que la aeronave cruza sobre el marcador externo (o FAF) hasta el cruzamiento del umbral de la pista o, en la ausencia de un marcador externo, cuando inicia el segmento de aproximación final hasta el cruzamiento del umbral de la pista. En la medición del tiempo, se considera cada categoría de aeronave que opera en el aeródromo.

Obs.: Los tiempos anteriormente descriptos son clasificados por categoría de aeronaves y son cronometrados en la torre de control del aeródromo. Estos tiempos serán registrados en formularios específicos (anexos 1 y 2, respectivamente).

Es importante explicar que durante las tomas de los tiempos, será observado el “Modus Operandi” de los organismos ATC del aeródromo en estudio.

#### **2º PASO**

##### **TIEMPO MEDIO DE OCUPACIÓN DE PISTA (MATOP)**

El tiempo medio de ocupación de pista será calculado por umbral de pista, una vez que cada pista tiene su configuración propia. Esto implica en tiempos distintos de ocupación de pista en cada umbral.

Después de la toma de los tiempos de ocupación de pista, el cálculo de la media aritmética de los tiempos de ocupación de pista (MATOP) es realizado, por categoría de aeronaves, entre estos tiempos.

$$\text{MATOPA} = \frac{\text{TOPDA} + \text{TOPPA}}{2}$$

$$\text{MATOPB} = \frac{\text{TOPDB} + \text{TOPPB}}{2}$$

$$\text{MATOPC} = \frac{\text{TOPDC} + \text{TOPPC}}{2}$$

$$\text{MATOPD} = \frac{\text{TOPDD} + \text{TOPPD}}{2}$$

$$\text{MATOPE} = \frac{\text{TOPDE} + \text{TOPPE}}{2}$$

### 3° PASO

#### MIX DE AERONAVES (MIX):

*Mix* de aeronaves, es la configuración de la flota en operación en el aeropuerto estudiado. De acuerdo al Doc 8168, las aeronaves son subdivididas en cinco categorías, según la velocidad de cruce del umbral de la pista, que debe ser 130% del valor de la velocidad de pérdida (stall) en la configuración de aterrizaje (full flaps, gear down). De esta manera, las aeronaves son clasificadas de la siguiente forma y en las siguientes categorías:

CAT "A" Velocidad menor que 90 kt

CAT "B" Velocidad entre 91/120kt

CAT "C" Velocidad entre 121/140kt

CAT "D" Velocidad entre 141/165kt

CAT "E" Velocidad entre 166/210kt

El porcentual, por categoría de aeronaves (*Mix*), será calculado a partir del movimiento total diario. Para la obtención de este índice, será necesario que la muestra presente datos referentes al período de una semana, pero la semana adoptada debe contener el día en que se efectuó la recolección de datos, para el cálculo del tiempo de ocupación de pista.

La figura a seguir muestra un ejemplo ilustrativo del cálculo del **Mix** de aeronaves:

	LUNES		MARTES		MIÉRCOLES		JUEVES		VIERNES	
CAT	ANV	PORC	ANV	PORC	ANV	PORC	ANV	PORC	ANV	PORC
A	32	8.42%	29	7.63%	25	6.51%	39	9.68%	25	6.31%
B	55	14.47%	57	15.00%	61	15.89%	73	18.11%	66	16.67%
C	283	74.47%	283	74.47%	286	74.48%	282	69.98%	297	75.00%
D	6	1.58%	11	2.89%	11	2.86%	8	1.99%	8	2.02%
E	4	1.05%	0	0.00%	1	0.26%	1	0.25%	0	0.00%
TOTAL	380	100%	380	100%	384	100%	403	100%	396	100%

MEDIA ARITMÉTICA	
CAT	Mix
A	7.71 %
B	16.03 %
C	73.68 %
D	2.27 %
E	0.31 %
TOTAL	100 %

#### 4º PASO

##### TIEMPO MEDIO PONDERADO DE OCUPACIÓN DE PISTA (TMOP)

Es la media ponderada de la media aritmética de los tiempos de ocupación de pista (MATOP) por categoría de aeronaves, tomándose en cuenta el **Mix** de aeronaves.

El tiempo medio debe ser calculado para cada umbral existente en el aeródromo, en función de las diferentes configuraciones de pista de taxi para cada umbral en uso.

$$TMOP = \frac{MIX_A \times MATOPA + MIX_B \times MATOPB + MIX_C \times MATOPC + MIX_D \times MATOPD + MIX_E \times MATOPE}{\sum MIX}$$

#### 5º PASO

##### VELOCIDAD DE APROXIMACIÓN FINAL (VA):

Velocidad necesaria para recorrer el tramo de aproximación final (SAF) para aterrizaje. Esta velocidad es el resultado de la división del largo del tramo de aproximación final por el tiempo de vuelo desde el marcador externo (o FAF) y hasta el umbral de la pista (T).

$$VAA = \frac{SAF}{T_A}$$

$$VA_B = \frac{SAF}{T_B}$$

$$VA_C = \frac{SAF}{T_C}$$

$$VA_D = \frac{SAF}{T_D}$$

$$VA_E = \frac{SAF}{T_E}$$

#### 6° PASO

##### VELOCIDAD MÉDIA DE APROXIMACIÓN FINAL (VM):

Media ponderada, tomándose en cuenta el mix de aeronaves, de las velocidades de aproximación final.

$$VM = \frac{MIX_A \times VA_A + MIX_B \times VA_B + MIX_C \times VA_C + MIX_D \times VA_D + MIX_E \times VA_E}{\sum MIX}$$

#### 7° PASO

##### DETERMINACIÓN DE LA SEPARACIÓN DE SEGURIDAD (SS):

El estudio prevé la posibilidad de que ocurra un despegue entre dos aterrizajes consecutivos, pero sin afectar la separación mínima reglamentaria (SMR), que en Brasil es establecida en la ICA 100-12, entre las aeronaves aterrizando y despegando. Con este objetivo, es necesario calcular una distancia de seguridad a ser sumada a la separación mínima reglamentaria entre las aeronaves en aproximación, de manera a posibilitar el despegue de una aeronave, en seguida del aterrizaje de la primera, pero sin comprometer la separación reglamentaria con la segunda en aproximación.

Calculándose la distancia recorrida en la aproximación final por la segunda aeronave, durante el tiempo en que la pista permaneció ocupada y sumándose la distancia calculada con la separación reglamentaria mínima adoptada, se obtiene la separación necesaria entre dos aterrizajes consecutivos. Esta distancia recorrida es el resultado entre la multiplicación de la velocidad media ponderada en la final y el tiempo medio ponderado de ocupación de pista.

$$SS = VM \times TMOP$$

#### 8° PASO

##### DETERMINACIÓN DE LA SEPARACIÓN TOTAL ENTRE DOS ATERRIZAJES CONSECUTIVOS (ST):

La separación total es el resultado entre el sumatorio de la separación de seguridad con la separación mínima reglamentaria. Así llegamos a:

$$ST = SMR + SS$$

Existen casos en que la SS puede ser desconsiderada. Normalmente esto puede pasar en aeropuertos que poseen dos o mas pistas, donde se puede aumentar el dinamismo de la operación al permitirse una aeronave alineada en una pista aguardando el aterrizaje de otra aeronave en otra pista.

#### **9º PASO**

##### **DETERMINACIÓN DEL TIEMPO MEDIO PONDERADO ENTRE DOS ATERRIZAJES CONSECUTIVOS (TMST):**

El tiempo medio ponderado empleado para recorrer la separación total entre dos aterrizajes consecutivos es obtenido dividiéndose esta distancia por la velocidad media ponderada del mix de aeronaves.

$$TMST = ST/VM$$

#### **10º PASO**

##### **DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE ATERRIZAJES EN UN INTERVALO DE UNA HORA (P):**

Dividiéndose el intervalo de una hora por el tiempo medio ponderado empleado para recorrer la separación total entre dos aterrizajes consecutivos, se obtiene el número de aterrizajes posibles con la separación propuesta en el intervalo propuesto.

$$P = 1\text{Hora (seg)}/TMST(\text{seg})$$

#### **11º PASO**

##### **DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE DESPEGUES EN UN INTERVALO DE UNA HORA (D):**

Aplicándose la separación total encontrada es posible intercalar un despegue entre dos aterrizajes consecutivos. Al sustraerse una aeronave del total de aterrizajes, se encuentra el número posible de despegues, en el intervalo de una hora.

$$D = P-1$$

#### **12º PASO**

##### **DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD DE PISTA (CP):**

Las operaciones de aterrizajes y despegues son igualmente distribuidas en cualquier aeródromo, compitiendo 50% a cada una de ellas, en el período de una hora.

Para la determinación de la capacidad de pista, es suficiente sumarse el número de aterrizajes encontrados con el número de despegues. Así llegamos a:

$CP=P+D$
----------

### 13° PASO

#### PORCENTUAL DE UTILIZACIÓN DE PISTA (PU):

Índice calculado a partir del movimiento total mensual, obtenido a través de una muestra conteniendo datos referentes al período de un año.

Para alcanzar una precisión adecuada en los cálculos efectuados, serán analizados los últimos doce meses de los sistemas de gestión de torre de control, pretendiendo medir el porcentual de utilización de cada pista del aeródromo.

Las tablas abajo evidencian un ejemplo ilustrativo del cálculo del porcentual de utilización de pista:

PISTA	% DE UTILIZACIÓN
A	86
B	14
TOTAL	100

MES	RWY A	RWY B	Mov. mensual
ENE	7622	2631	10253
FEB	6364	3229	9593
MAR	9239	2409	11648
ABR	9965	1184	11149
MAY	10811	896	11707
JUN	11280	291	11571
JUL	11637	620	12257
AGO	12145	263	12408
SET	11687	273	11960
OCT	9177	2184	11361
NOV	7765	2936	10701
DIC	7487	3665	11152
TOTAL	115179	20581	135760



## TOMA DEL TIEMPO DE OCUPACIÓN DE PISTA DURANTE EL DESPEGUE

**Hora de inicio:** \_\_\_\_\_ **Hora de término:** \_\_\_\_\_

[illegible]

The diagram illustrates five tables, each with two columns: 'CAT' and '(X)'. The tables are arranged as follows:

- Table A:** Located at the top left.
- Table B:** Located at the top middle.
- Table C:** Located at the top right.
- Table D:** Located at the bottom left.
- Table E:** Located at the bottom middle.

A vertical line is positioned to the left of tables A, D, and E.

## TOMA DEL TIEMPO DE OCUPACIÓN DE PISTA DURANTE EL ATERRIZAJE

**Hora de inicio:** \_\_\_\_\_ **Hora de término:** \_\_\_\_\_

[illegible]

### TOMA DEL TIEMPO DE VUELO ENTRE EL OM Y LA THR

**Hora de término:**\_\_\_\_\_

[illegible]

## APÉNDICE D

### ABREVIATURAS

<b>ARR</b>	Llegada
<b>ATC</b>	Control de tránsito aéreo
<b>ATCO</b>	Controlador de tránsito aéreo
<b>CAT</b>	Categoría
<b>CFP</b>	Capacidad física de pista
<b>CTP</b>	Capacidad teórica de pista
<b>CT</b>	Toma de tiempo
<b>CGNA</b>	Centro de Gestión de la Navegación Aérea
<b>DEP</b>	Despegue
<b>FAA</b>	Federal Aviation Administration
<b>IEPV</b>	Impresos especiales de protección al vuelo
<b>OM</b>	Marcador externo
<b>FAF</b>	Fijo de aproximación final
<b>FPL</b>	Mensaje de plan de vuelo presentado
<b>IMC</b>	Condiciones meteorológicas de vuelo por instrumentos
<b>RWY</b>	Pista
<b>SAS</b>	Sistema de Análisis de Situación
<b>SEP REQ</b>	Separación necesaria
<b>SGTC</b>	Sistema de Gestión de Torre de Controle
<b>TARIS</b>	Terminal de presentación radar con imagen sintética
<b>TG</b>	Toma y despegue
<b>TOP</b>	Tiempo de ocupación de pista
<b>THR</b>	Umbral de la pista
<b>TPH</b>	Hora punta típica

## APÉNDICE E

### DEFINICIONES

#### a) CAPACIDAD FÍSICA DE PISTA

Número máximo de operaciones posibles de lograr, en un intervalo de sesenta minutos, en función del tiempo de ocupación de la pista. ( $t_{op}$ ).

#### b) CAPACIDAD DE PISTA

Capacidad de pista calculada, para un intervalo de sesenta minutos, en función del tiempo medio de ocupación de pista aumentado de la legislación relativa a la separación reglamentaria entre aeronaves, así como de las normas y procedimientos específicos utilizables en las operaciones aéreas del local considerado.

#### c) CATEGORÍA DE AERONAVE

Clase de aeronaves subdivididas en cinco grupos (a, b, c, d, e), definidas en función de la velocidad de cruce del umbral, que debe ser de 130 por ciento del valor de la velocidad de pérdida (stall), en la configuración de aterrizaje (full flaps, gear down).

#### d) MIX DE AERONAVES

Distribución porcentual de la flota de aeronaves en operación en el aeropuerto estudiado, según las categorías de las aeronaves.

#### e) PORCENTUAL POR CATEGORÍA DE AERONAVES

Índice calculado a partir del movimiento total diario, constante del IEPV 100-34 (Movimiento de Aeronaves en Aeródromos) o en los Sistemas de Gestión de Torre de Control, obtenido por medio de la media porcentual de una muestra, conteniendo datos referentes al período de una semana de días útiles.

#### f) PORCENTUAL DE UTILIZACIÓN DE PISTA DEL AERÓDROMO

Índice calculado a partir del movimiento total diario, obtenido por medio de la media porcentual de una muestra conteniendo datos referentes al período de un año, con el objetivo de aprobar la confiabilidad de los datos.

#### g) SATURACIÓN

Situación en que la demanda de tránsito aéreo está arriba de la capacidad aeroportuaria o de un determinado sector de control.

#### h) TIEMPO DE OCUPACIÓN DE PISTA DURANTE EL DESPEGUE.

Tiempo de ocupación de pista durante el despegue, computado a partir del momento en que la aeronave deja el punto de espera hasta el momento en que cruza el umbral opuesto.

#### i) TIEMPO DE OCUPACIÓN DE PISTA DURANTE EL ATERRIZAJE.

Tiempo de ocupación de pista durante el aterrizaje, computado a partir del instante en que la aeronave cruza el umbral, hasta el momento en que abandona la pista.

#### j) TIEMPO MEDIO DE OCUPACIÓN DE PISTA POR CATEGORÍA DE AERONAVE.

Media aritmética, por categoría de aeronave, entre el tiempo de ocupación de pista durante el despegue y el tiempo de ocupación de pista durante el aterrizaje.