



Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional Haedo.
Aeropuerto, Aeronavegación e Impacto Ambiental.

CAPACIDAD, DEMORA Y DEMANDA

Docente: Ing. Aer. Varrenti, Carlos.
JTP: Ing. Aer. Miguel, Alejandro M.

cvarrenti@frh.utn.edu.ar
amiguel@frh.utn.edu.ar

Capacidad

El término Capacidad usualmente refiere a una medida/rendimiento de una instalación de servicios durante un período de tiempo, normalmente definido como el número máximo de elementos que una instalación puede acomodar durante un período de tiempo definido.



Capacidad

Al analizar la capacidad de un Aeropuerto, deben analizarse diversos elementos que lo componen.

a) Airside

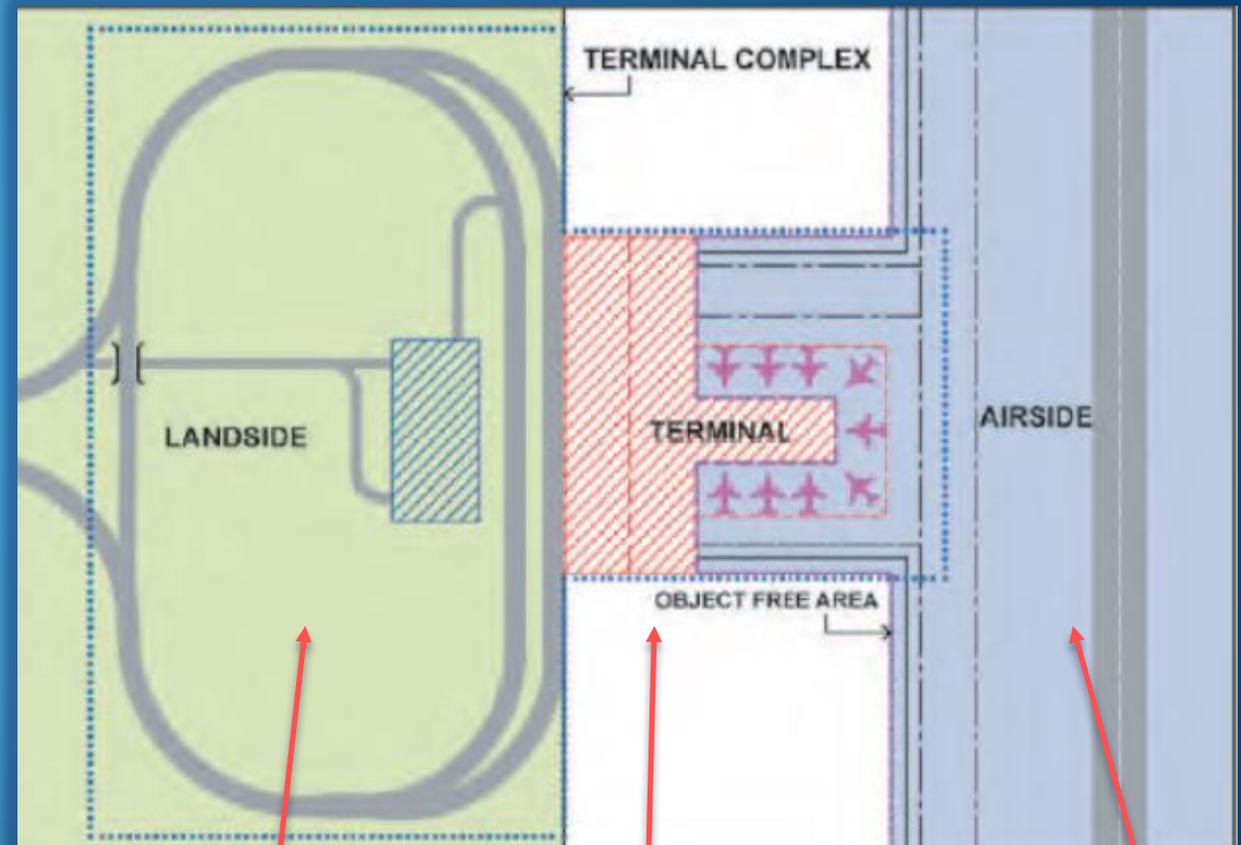
- Espacio aéreo del AD.
- Pistas.
- Calles de rodaje.
- Gates/Plataformas Remotas.

c) Terminal

- Áreas de tránsito.
- Servicios.

b) Landside

- Vía de acceso.
- Medios de transporte.



Pasajeros/Vehículos por hora.

Pasajeros/hora.

Operaciones/hora.

Capacidad



Capacidad, Demora y Demanda.

Cátedra : Aeropuertos, Aeronavegación e Impacto Ambiental (A3I) FRH-UTN.

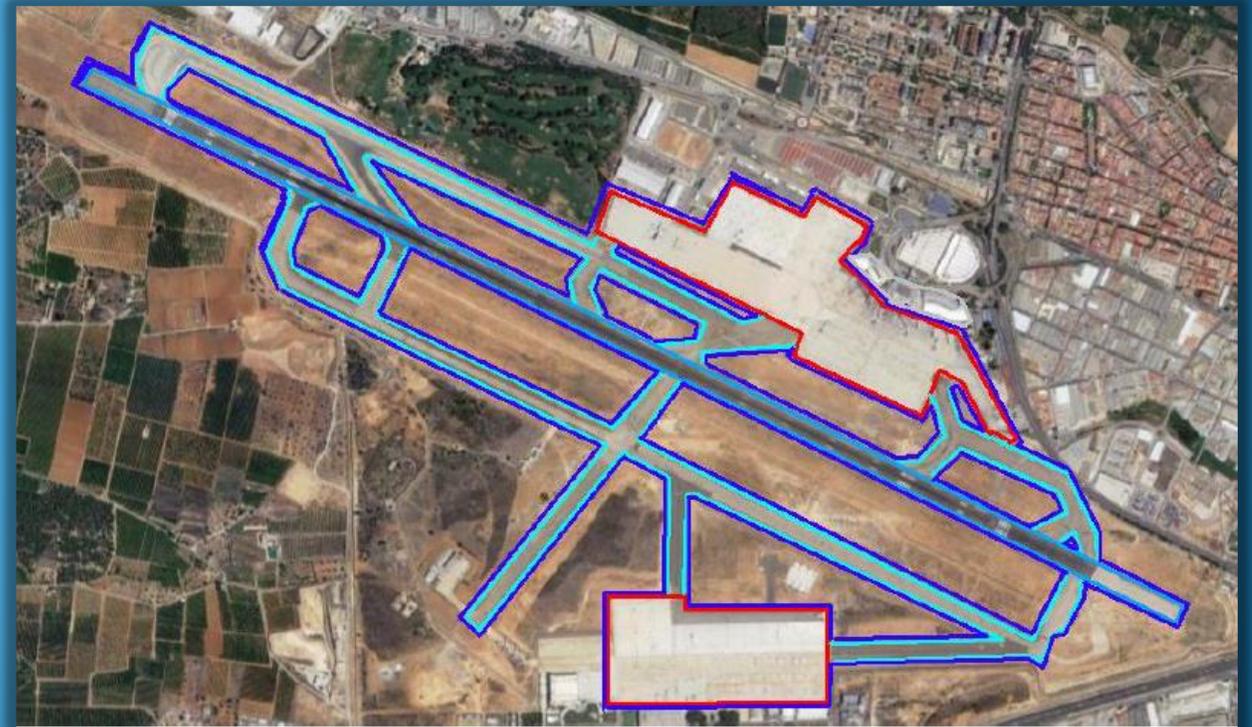
Capacidad

En esta cátedra sólo nos centraremos en analizar la Capacidad del lado Aire y sus métodos de evaluación.

a) Airside

- Pistas y E. Aéreo del AD.
- Calles de rodaje.
- Gates/Plataformas Remotas.

De las expuestas anteriormente, nos centraremos en evaluar la C. de pista y la C. de Gates.



Capacidad

Definiciones

- **Operación:** Despegue o aterrizaje realizado en un aeródromo.
- **Movimiento:** Operación que involucra el despegue y aterrizaje de una aeronave.
- **Frecuencia:** Cantidad de operación programada por unidad de tiempo.
- **Touch & Go:** Es 1 movimiento que involucra dos operaciones, 1 aterrizaje y un despegue, pero la aeronave no se detiene.

Este tipo de actividad es común en entrenamientos de pilotos y pueden generar gran cantidad de MOVIMIENTOS por hora.



Capacidad de pista

La capacidad horaria de un sistema de pistas es el máximo número de operaciones aéreas que pueden realizarse en una hora bajo condiciones específicas de operación (techo- visibilidad- atc- aeronaves- tipo de operación). Se consideran las siguientes capacidades:

Capacidad Última o Saturación

Tasa máxima de aeronaves que pueden ser gestionadas durante un dado período bajo condiciones de operación y demanda continua.

Capacidad práctica

Tasa de operaciones que un aeropuerto puede aceptar considerando una demora tolerable.

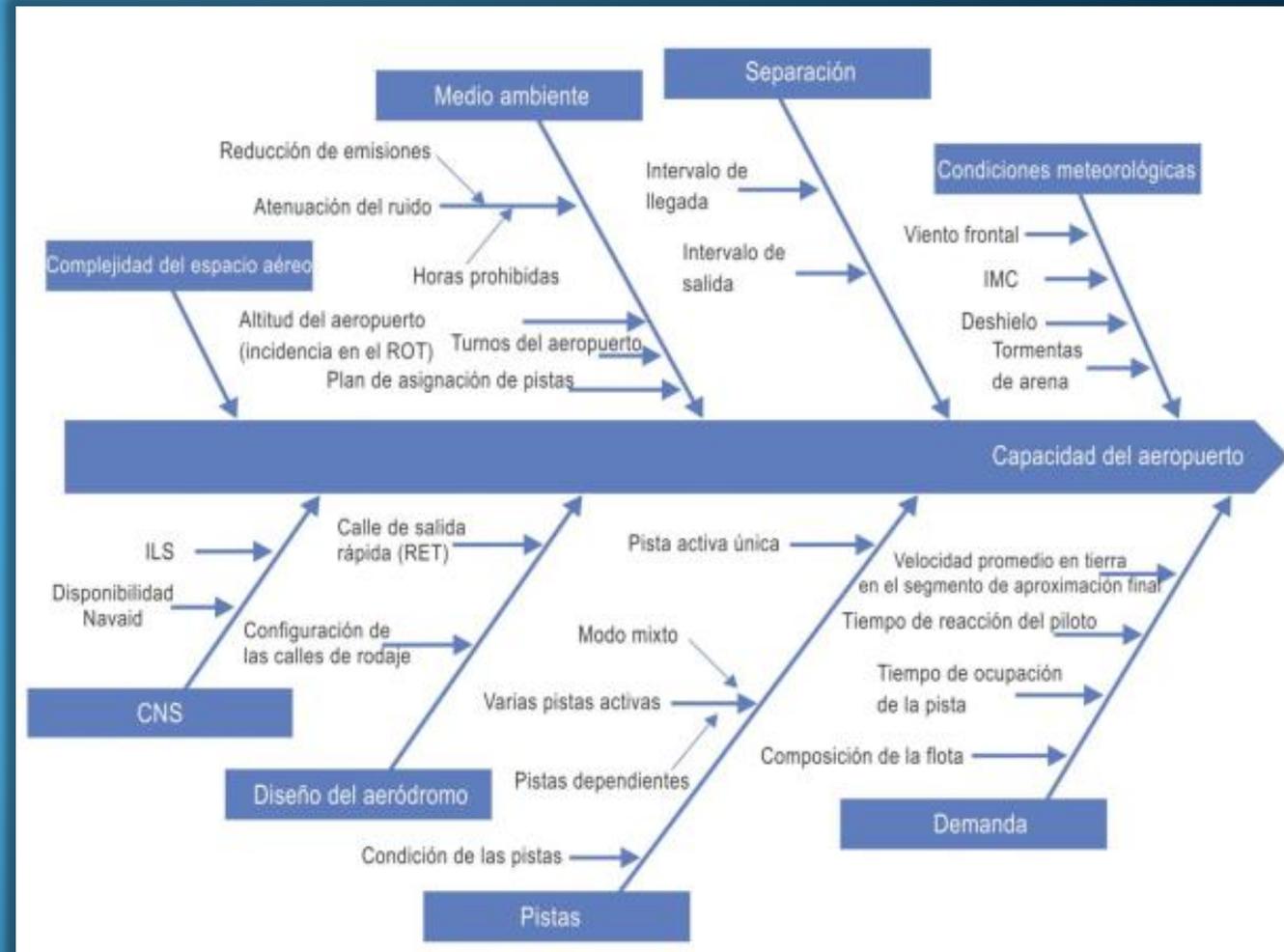
La demora tolerable es diferente entre Aeropuertos. Estas Demoras son acordadas entre el Explotador del aeropuerto y las líneas aéreas.

Ejemplo: Demoras promedio de 5 min. para aeronaves que parten a una determinada hora.

Capacidad de pista

Factores que afectan la capacidad

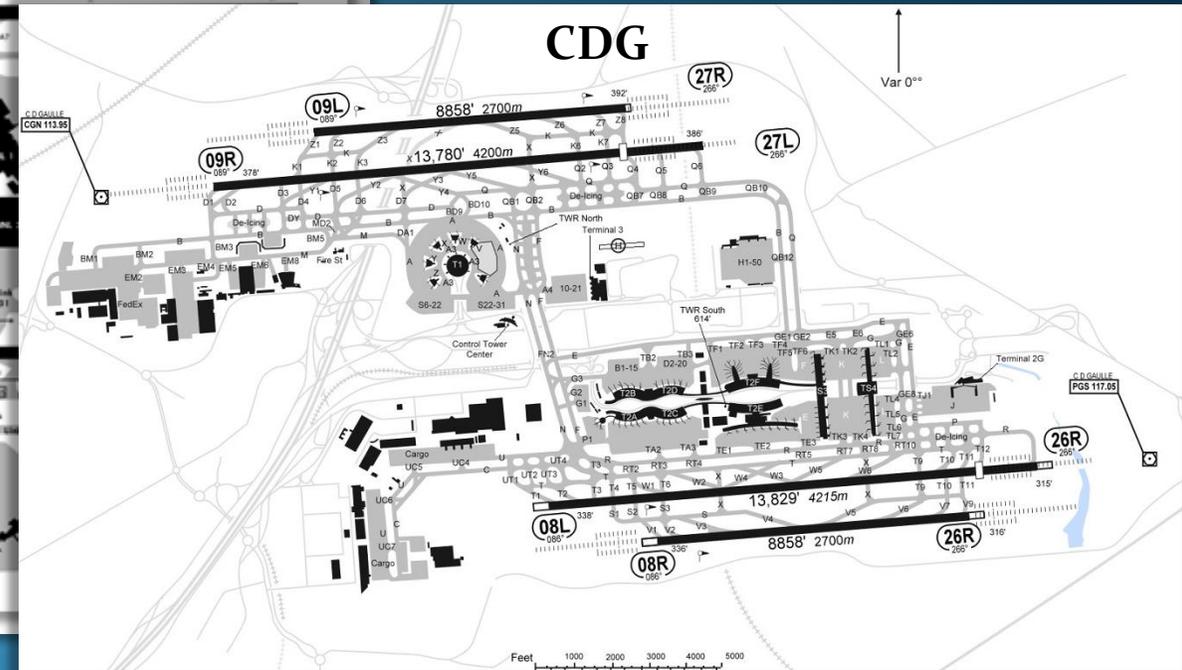
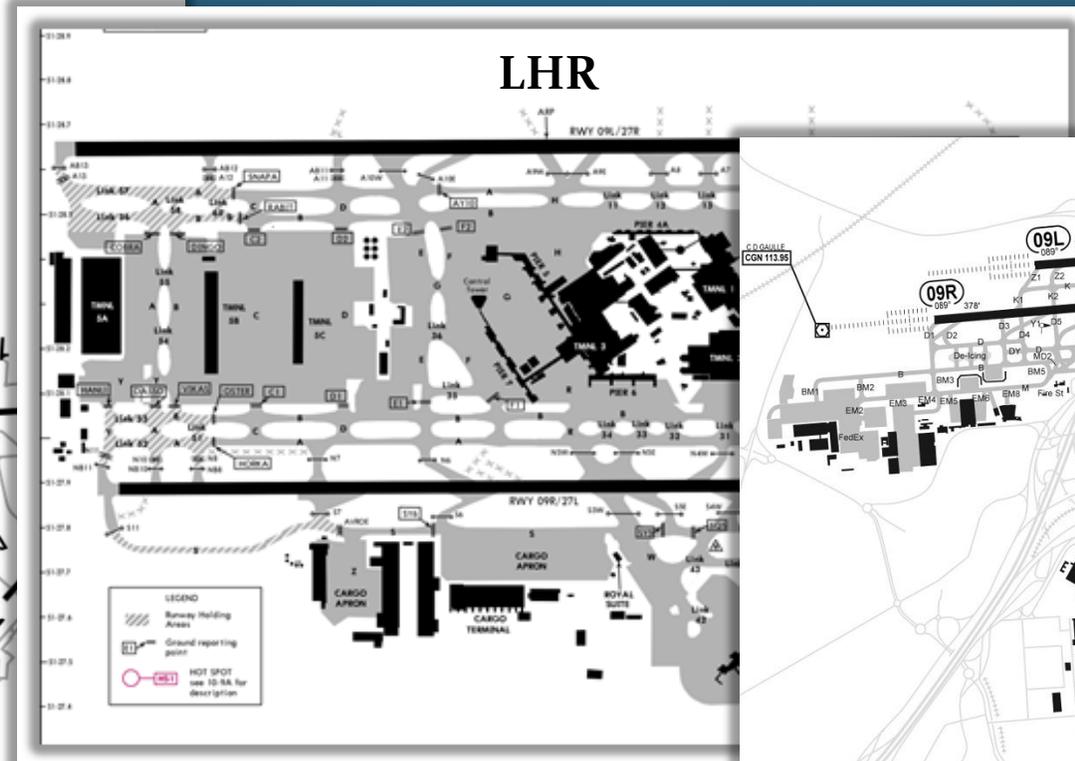
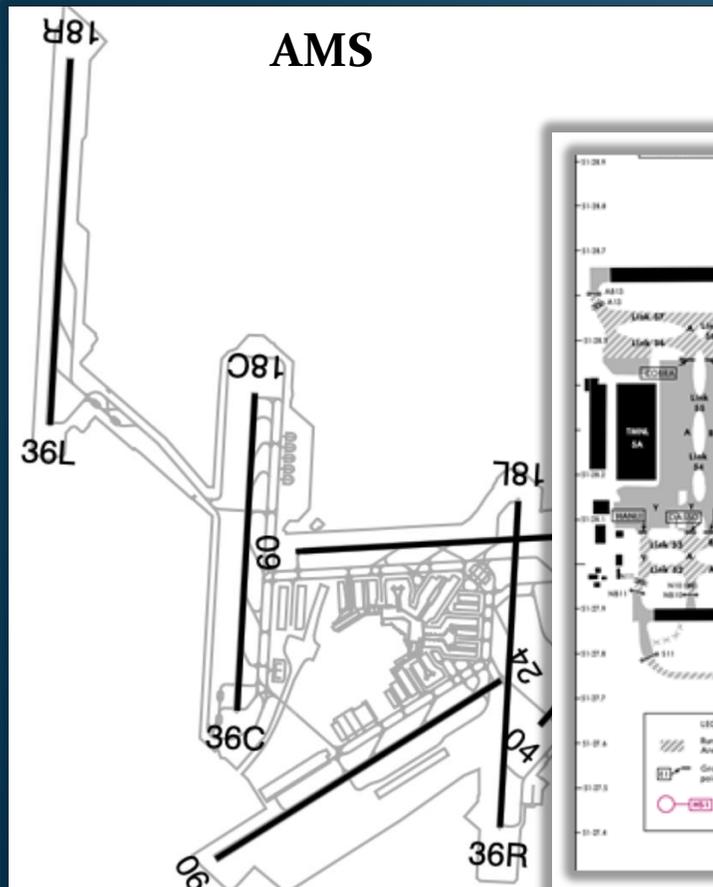
- Configuración de la pista (Número de pistas en uso, ubicación de las salidas de pista, etc).
- Mix de aeronaves (Porcentaje de aviones con diversas categorías de estela varicosa).
- Condiciones climáticas (visibilidad, techo, dirección del viento y velocidad).
- **Vuelo IFR o VFR.**
- **Separación entre aeronaves.**
- Equipamiento del aeropuerto (tipo de ayudas a la navegación, aproximación y ATC).
- Procedimientos de operación (consideraciones de ruido, procedimientos de aproximación y salida).
- Estado de Pista (Acumulación de Agua, Nieve, etc).



Capacidad de pista

Factores que afectan la capacidad

- Configuración de la pista y terminales (Número de pistas en uso, ubicación de las salidas de pista, etc).



Capacidad, Demora y Demanda.

Cátedra : Aeropuertos, Aeronavegación e Impacto Ambiental (A3I) FRH-UTN.

Capacidad de pista

Datos de algunos aeropuertos relevantes:

Airport	Active runways	Capacity (atm/h)	Capacity ¹⁾ (thousand atm/yr)	Land taken (ha)
Frankfurt Main	3	80	492	1397
Paris Charles de Gaulle	4	114	687	3309
London Heathrow	2	78	480	1227
Amsterdam Schiphol	5	106	638	2147

Estimated for the period of 16.5 h/day.

Compiled from: Aeroports de Paris, 2007; BAA, 2007; Fraport, 2007; Schiphol Airport, 2007.

Capacidad de pista

Métodos para medir la capacidad

➤ Estadísticos:

Son procedimientos que exponen datos cuantitativos y cualitativos mediante técnicas de recolección, presentación, descripción y análisis. Proporcionan una capacidad estimada basada en estadísticas de aeropuertos de similares características de Operación.

➤ Analíticos:

Proporcionan una representación que se asemeja a un sistema real a través de conjuntos de ecuaciones y formulaciones. Normalmente son económicos, fáciles de usar y transparentes para comprobar y verificar. En ciertos casos son demasiado complejos de aplicar, lo que requiere simplificar los supuestos para que sean viables.

➤ Simulación

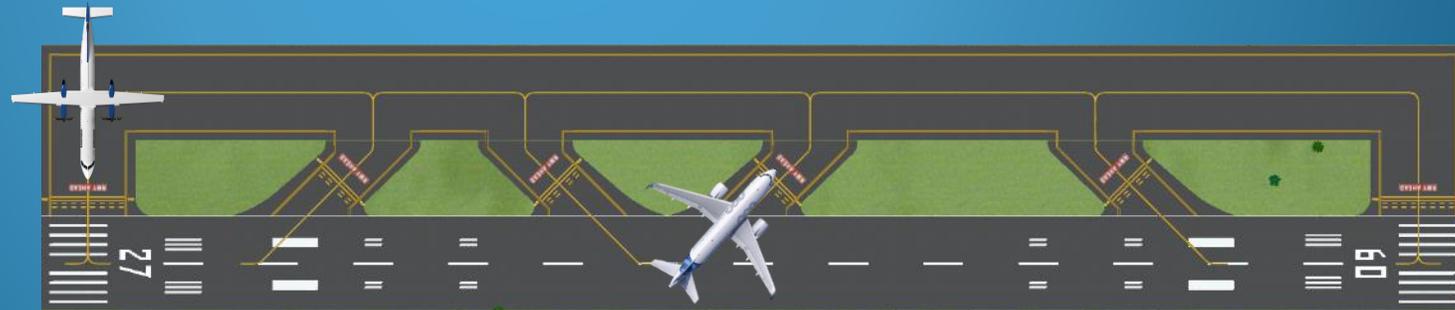
Son modelos de tiempo rápido que emulan el movimiento de las aeronaves. El tiempo necesario para ejecutar la simulación es menor que el tiempo real, lo que permite estimar en minutos u horas, eventos que requerirían días, meses o incluso años de experimentación. Proporcionan detalles de representaciones considerables de interacciones de sistemas complejos que excluyen las soluciones analíticas. Requieren de un número importante de variables y estadísticas a analizar.

Capacidad de pista

Premisas para medir la capacidad de pista

Al abordar los modelo deberán considerarse las siguientes reglas básicas de secuenciación:

- Las aeronaves que llegan tienen prioridad en el uso de la pista sobre las aeronaves que salen.
- Dos aeronaves no pueden ocupar la pista al mismo tiempo.
- Los despegues pueden realizarse si la pista está despejada y el arribo posterior está, al menos, a cierta distancia de seguridad del umbral de pista.



Capacidad de pista

Métodos para medir la capacidad

- Reglas de secuenciación al límite.



Capacidad de pista

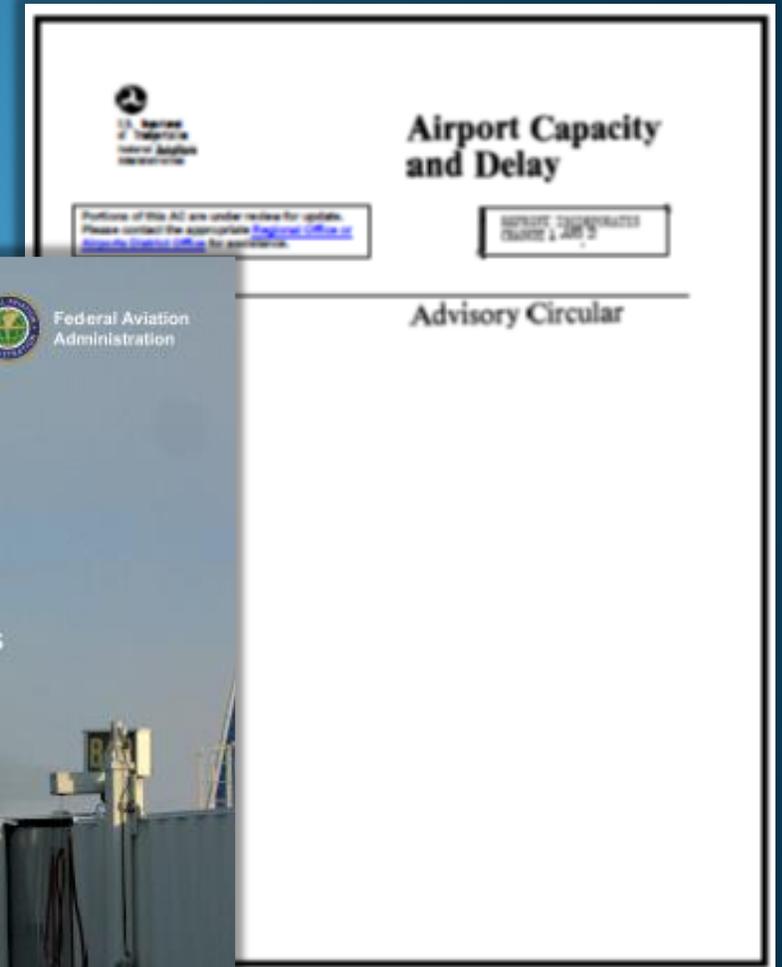
Métodos Estadísticos

Los recursos utilizados para esta metodología son:

- FAA AC 150/5060-5, “Airport Capacity and Delay” (1983).
- Perfiles de Capacidad de Aeropuertos (De similares características al AD a analizar).

Requerimientos:

- La configuración de la pista del aeropuerto.
- Reglas de vuelo (VFR/IFR).
- Flotas de aeronaves previstas (MIX).
- Porcentaje de arribos y despegues.
- Configuración de calles de salida.



Capacidad de pista

Métodos Estadísticos

- FAA AC 150/5060-5, “Airport Capacity and Delay” (1983).

El primer paso para utilizar este método es definir el Mix de aeronaves. La combinación de aeronaves es el porcentaje relativo de operaciones realizadas por cada una de las clases de aeronaves (A, B, C y D). La tabla identifica los aspectos físicos de las cuatro clases de aeronaves y su relación con los estándares de estela turbulenta.

El Mix queda definido en sumas de porcentaje (%) como:

$$\text{Mix} = (C+3D)$$

<u>Aircraft Classification</u>	<u>Types of Aircraft^a</u>
Class A	Small single-engine aircraft weighing 12,500 lb ^b or less (e.g., PA18, PA23, C180, C207)
Class B	Small twin-engine aircraft weighing 12,500 lb ^b or less and Lear jets (e.g., PA31, BE55, BE80, BE99, C310, C402, LR25)
Class C	Large aircraft weighing more than 12,500 lb ^b and up to 300,000 lb ^b (e.g., CV34; CV58; CV88; CV99; DC4; DC6; DC7; L188; L49; DC8-10, 20 series; DC9; B737; B727; B720; B707-120; BA11; S210)
Class D	Heavy aircraft ^c weighing more than 300,000 lb (e.g., L1011; DC8-30, 40, 50, 60 series; DC10; B707-300 series; B747; VC10; A300; Concorde; IL62)

Capacidad de pista

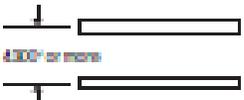
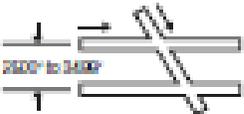
Métodos Estadísticos

- FAA AC 150/5060-5, “Airport Capacity and Delay”.
- Tabla Cap. 2

Esta Tabla se utiliza para determinar si la configuración de pista y su capacidad, se adecua al Volumen anual de operaciones (ASV) proyectado.

Se debe ingresar con la configuración de pista proyectada y el Mix de aeronaves.

Ej: Buscar las operaciones y ANV para 2 pista y Mix de 95 (C+3D).

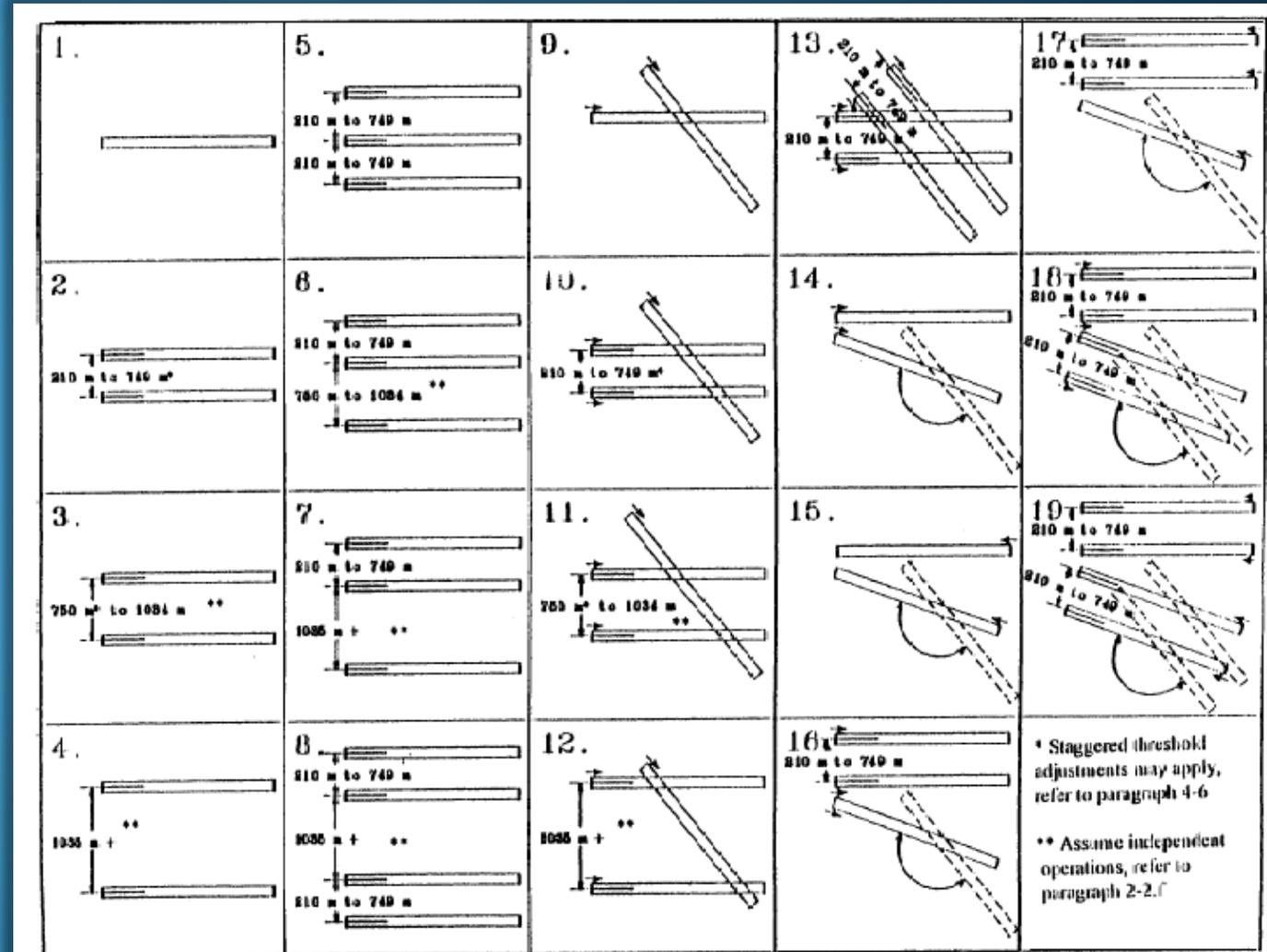
Configuration	Runway configuration diagram	Mix index— percent (C + 3D)	Hourly capacity (operations per hour)		Annual service volume (operation per year)
			VFR	IFR	
Single Runway		0–20	98	59	230,000
		21–50	74	57	195,000
		51–80	63	56	205,000
		81–120	55	53	210,000
		121–180	51	50	240,000
Independent IFR Parallels		0–20	197	119	370,000
		21–50	149	114	320,000
		51–80	126	111	305,000
		81–120	111	105	315,000
		121–180	103	99	370,000
Parallels plus Crosswind Runway		0–20	197	62	355,000
		21–50	149	63	285,000
		51–80	126	65	275,000
		81–120	111	70	300,000
		121–180	103	75	365,000

Capacidad de pista

Métodos Estadísticos

- FAA AC 150/5060-5, "Airport Capacity and Delay".
- Tabla Cap. 2

Configuraciones de pista disponibles para el análisis.



Capacidad de pista

Métodos Estadísticos

- FAA AC 150/5060-5, "Airport Capacity and Delay".
- Tabla Cap. 3

Estas Tablas se utilizan para realizar un análisis más fino, donde no sólo se analiza la configuración de pista, sino también su modo de operar (Arribos y despegues).

Se debe elegir una figura y dirigirse a la figura que indica la columna 4 o 5 (VFR o IFR).

Ej a desarrollar: Figura 1, IFR

RUNWAY USE DIAGRAM	DIAG. NO.	RUNWAY SPACING ^A IN FEET (S)	FIGURE NO.			
			FOR CAPACITY		FOR DELAY	
			VFR	IFR	VFR	IFR
	1	N.A.	2-3	2-43	2-73	2-89
	2	700 ^B OR MORE	2-4	2-44	2-71	2-90
	3	700 ^B TO 2499	2-5	2-44	2-72	2-90
	4	2500 TO 3499	2-6	2-44	2-73	2-90
	5	3500 OR MORE	2-6	2-45	2-73	2-91
	6	700 ^B TO 2499	2-7	2-44	2-74	2-90
	7	2500 TO 4299	2-8	2-46	2-74	2-92
	8	4300 OR MORE	2-8	2-47	2-74	2-93

Capacidad de pista

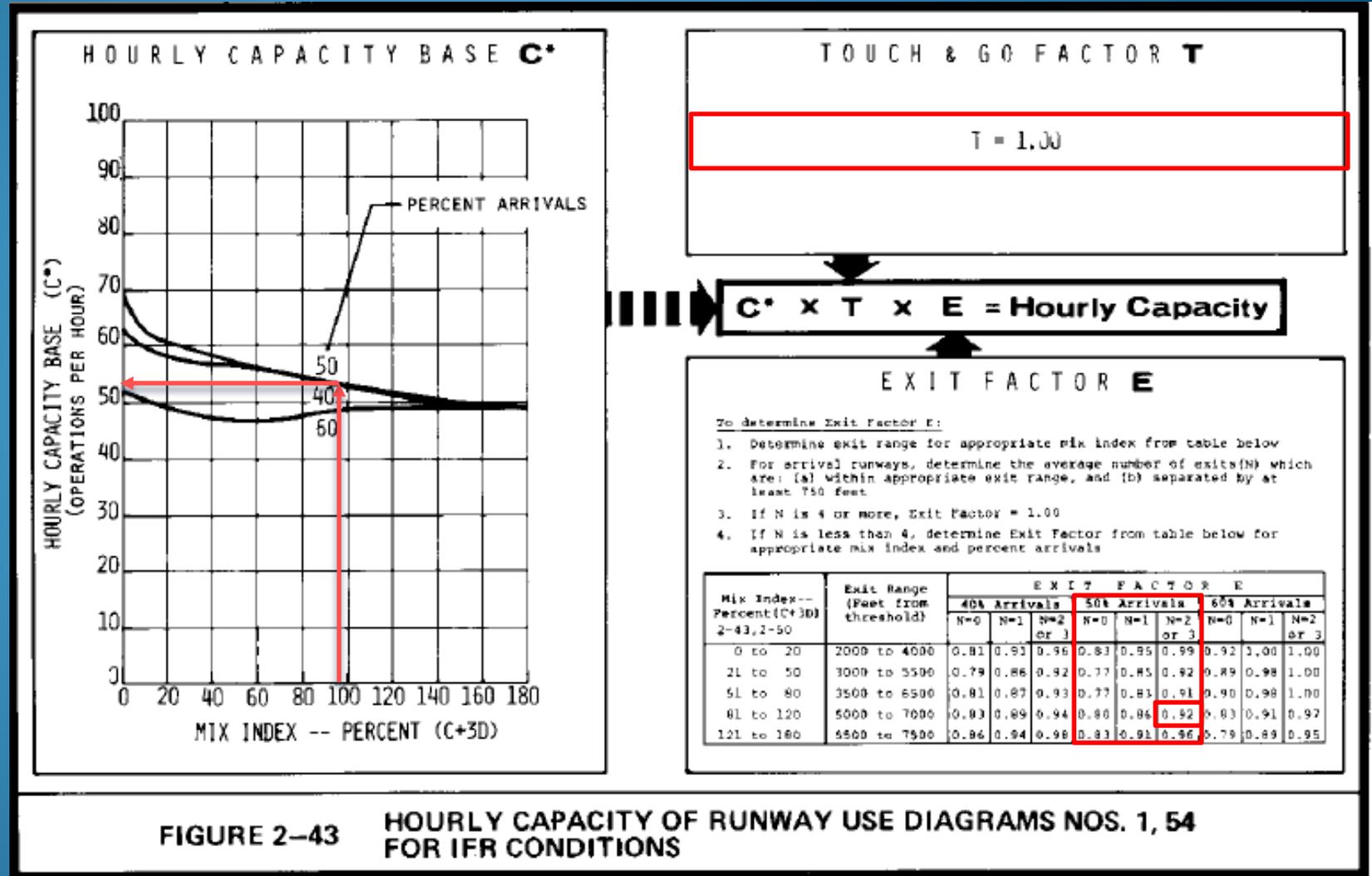
Métodos Estadísticos

- FAA AC 150/5060-5, "Airport Capacity and Delay".
- Tabla Cap. 3

Datos:

- IFR.
- 50% Arribos.
- MIX: A=0%, B=5%, C=86%, D=3%.
- No hay T&Go.
- Más de 2 calles de salida de pista.

Datos reales de San Diego (SNA)



Capacidad de pista

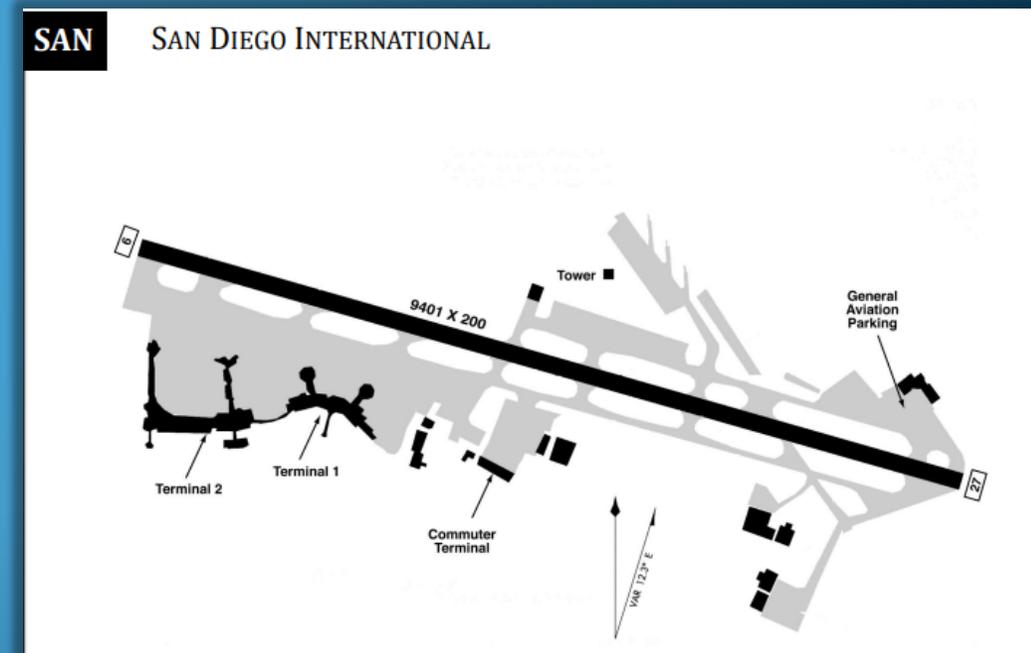
Métodos Estadísticos

➤ Perfiles de Capacidad de Aeropuerto

Ej: Perfil de Capacidad del Aeropuerto de San Diego (EE.UU)

Annual Fleet Mix by Wake Class (Percentage)					
Airport	Weather	Heavy	B757	Large	Small
SAN	Visual	2.8	6.9	77.1	13.2
	Marginal/Instrument	2.9	7.1	79.2	10.8

INSTRUMENT		SAN DIEGO INTERNATIONAL			
SAN Scenario	Arrival Runways	Departure Runways	Procedures	Hourly Rate	
				ATC Facility Reported	Model-Estimated
CURRENT OPERATIONS	27	27	Non-Precision Instrument Approach, Radar Separation	48	48
FUTURE IMPROVEMENTS Improved Runway Delivery Accuracy	27	27		N/A	48



https://www.faa.gov/airports/planning_capacity/profiles

Capacidad, Demora y Demanda.

Cátedra : Aeropuertos, Aeronavegación e Impacto Ambiental (A3I) FRH-UTN.

Capacidad de pista

Métodos Estadísticos (Comparación)

- FAA AC 150/5060-5, “Airport Capacity and Delay”.
- Perfiles de Capacidad SAN.

	AC 150/5060-5 Cap 2	AC 150/5060-5 Cap 3	Perfil de SNA
Capacidad Horaria [Op/h]	53	47	48

Datos:

- IFR.
- 50% Arribos.
- MIX: 95 (A=0%, B=0%, C=86% D=3%).
- No hay T&Go.
- Más de 2 Calles de salida de pista.

Nota: SNA tiene un comportamiento similar a la configuración analizada con la AC 150/5060-5 (50% arribos y 50% Dep.).

Capacidad de pista

Métodos Estadísticos

➤ C_w con diversas configuraciones de pista:

$$C_w = \frac{\sum_{i=1}^n C_i W_i P_i}{\sum_{i=1}^n W_i P_i}$$

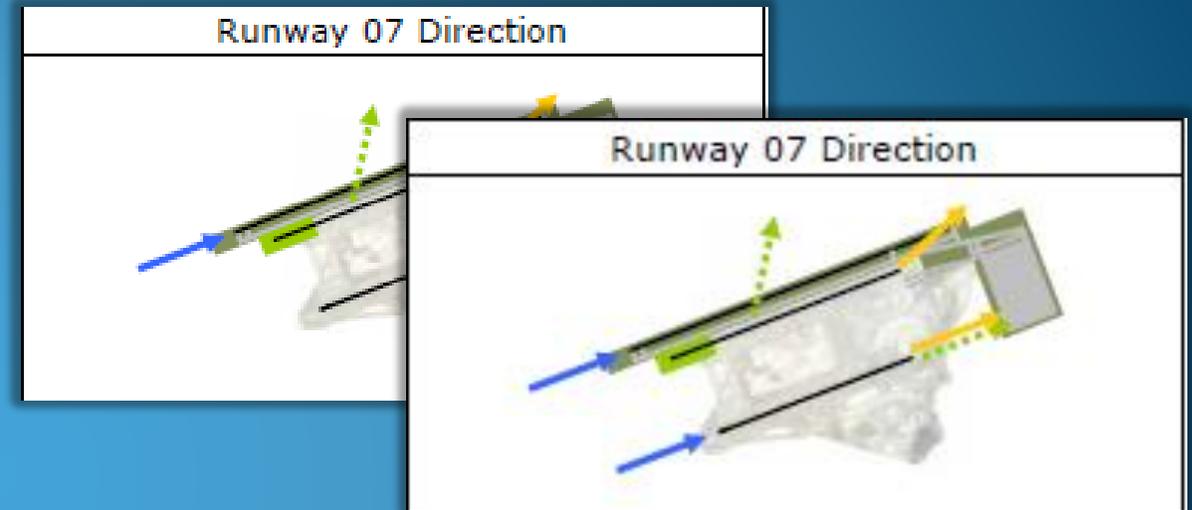
Donde:

C_w = Capacidad de pista ponderada.

i = Distintas configuraciones a utilizar.

P_i = Proporción del año con capacidad C_i .

W_i = Peso a aplicar a la capacidad tomado de la tabla.



Percentage of predominant capacity	Weight			
	Mix index in VFR		Mix index in IFR	
	0-180	0-20	21-50	51-180
91 or more	1	1	1	1
80-90	5	1	3	5
66-80	15	2	8	15
51-65	20	3	12	20
0-50	25	4	16	25

Capacidad de pista

Métodos Estadísticos

➤ Ejemplo de aplicación: Cw con diversas configuraciones de pista (pistas paralelas)

Se le asigna el 100% a la config. de mayor capacidad. El resto sale por regla de 3.

Runway use	weather	Mix index	% of year (Pi)	Hourly Capacity (Ci)	Percent of predominant capacity	Weighting Factor (Wi)	Pi*Ci*Wi
1	VMC (Optimal)	120	50	70	100	1	35
2	IMC (Instrument)	80	30	50	71	15	225
3	IMC (Instrument)	100	20	60	86	5	60

$$C_w = \frac{\sum_{i=1}^n C_i W_i P_i}{\sum_{i=1}^n W_i P_i}$$

Calculations	Max % of year	70
	$\sum P_i$	1
	$\sum P_i * C_i * W_i$	320
	$\sum P_i * W_i$	6
	Cw =	53,33

Percentage of predominant capacity	Weight			
	Mix index in VFR		Mix index in IFR	
	0-180	0-20	21-50	51-180
91 or more	1	1	1	1
80-90	5	1	3	5
66-80	15	2	8	15
51-65	20	3	12	20
0-50	25	4	16	25

Capacidad de pista

Métodos Estadísticos

➤ ASV: Annual Service Volume

Es una estimación de la capacidad anual del aeropuerto, teniendo en cuenta diferentes configuraciones de uso de pista, mix de aeronaves, y condiciones meteorológicas. Este cálculo proporciona una noción anual de operaciones, considerando las configuraciones de pista propuestas y las métricas que analizan las operaciones anuales, operaciones en mes pico y hora pico.

$$ASV = C_w \times H \times D$$

$$ASV = \left[\frac{Op}{h} \right] \times \left[\frac{h}{Dia} \right] \times [Dias]$$

C_w = Capacidad horaria ponderada de la configuración de pista.

H = Demanda por hora = (demanda media diaria pico)/(demanda media de hora pico en el mes pico).

D = Demanda diaria = (demanda anual)/(demanda media diaria en el mes pico).

Capacidad de pista

Métodos Estadísticos

➤ ASV (Estimado)

Table 3-2. Typical Demand Ratios

Mix Index	Daily (D)	Hourly (H)
0-20	280-310	7-11
21-50	300-320	10-13
51-180	310-350	11-15

Calculate **ASV** by the following **equation**:

$$ASV = C_v \cdot D \cdot H$$

Capacidad de pista

Métodos Estadísticos

- Ej: Se quiere determinar el ASV considerando una nueva capacidad de pistas $C_w = 66$ Op/h.

<u>Month</u>	<u>Monthly Aircraft Operations</u>	<u>No. of Days in Month</u>	<u>Average Daily Aircraft Operations</u>
January	30,938	31	998
February	27,244	28	973
March	30,442	31	982
April	29,850	30	995
May	31,310	31	1,010
June	30,600	30	1,020
July	31,775	31	1,025
August	32,550	31	1,050
September	30,660	30	1,022
October	31,682	31	1,005
November	29,460	30	982
December	31,093	31	1,003
Total Annual Aircraft Operations	367,604		

For the assumed condition, the ratio of annual aircraft operations to average daily operations during the peak month is:

$$\text{Daily Ratio} = \frac{367,604}{1,050} = 350,$$

and for the assumed conditions, the ratio of average daily aircraft operations to average peak hour aircraft operations of the peak month is:

$$\text{Hourly Ratio} = \frac{1,050}{75} = 14.$$

Therefore, the annual service volume is:

$$\begin{aligned} \text{ASV} &= C_w \times D \times H \\ &= 66 \times 350 \times 14 \\ &= 323,400 \text{ operations per year} \end{aligned}$$

Nota: 75 Op/h se obtuvieron por datos estadísticos no expuestos aquí.

Capacidad de pista

Métodos analíticos

- Modelo discreto.
- Estimar mediante cálculos y gráficos la Capacidad Última o de Saturación.
- El método analítico limita su análisis al sistema de pista, su senda de aproximación y calles de salida.
- Ponderan sucesos en base a probabilidades.
- La Capacidad se computa como el recíproco del tiempo medio entre arribos/despegues.

En este curso sólo analizaremos una Pista destinada exclusivamente a arribos (Capacidad en arribos).

SPREADSHEET CAPACITY MODEL - SINGLE RUNWAY

INPUTS				OUTPUTS					
Meteorological Conditions	VMC, % Occurrence	30%	IMC, % Occurrence	10%	Arrivals Only Capacity	34	24	33	
VMC-Departure-Arrival Sep.	2.0	nm	Arrival - Arrival Std. Dev.	18.0	sec	Arrivals Capacity (including TMG's)	34	24	33
IMC-Departure-Arrival Sep.	2.0	nm	Departure ROT Std. Dev.	6.0	sec	Departures Only Capacity	80	51	77
Length of Common Approach	7.0	nm	Z-Value, 95% Confidence	1.645		Mixed Ops - Departure Capacity (including TMG)	9	24	5
Operations Assumption on Touch-N-Go's	0%		T-Factor (Touch-N-Go's)	1.00		Total Mixed Operations Capacity	37	48	38
RESET INPUTS									
Aircraft Classification	Small - S	Small - T	Small +	Large-TP	Large-Jet	Large-T5T	Heavy		
Previous FAA Category	A	B	C	C	C	C	D		
Maximum Gross Takeoff Weight (MTOW)	Less than 12,500 lbs (Single Engine)	Less than 12,500 lbs (Twin Engine)	Between 12,500 lbs and 41,000 lbs	Between 41,000 lbs and 255,000 lbs	Between 41,000 lbs and 300,000 lbs	Between 255,000 lbs and 300,000 lbs	More than 300,000 lbs		
Operating Fleet Mix	Enter the actual or expected % share for each aircraft class								
Share Allocations	30.0%	10.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%		
Arrival Runway Occupancy Time in Seconds	Enter the estimated time from touchdown to runway exit								
Average Approach Speeds	32	40	42	45	46	51	55		

AIRFRAME (Ver. 2.0) COPYRIGHT 1991			
Classes: SMALL MEDIUM LARGE HEAVY			
Class Mix (%): RWY 1: 16 4 73 7			
RWY 2: 16 4 73 7			
ARVL ROT (s): RWY 1: 45 50 50 50			
RWY 2: 45 50 50 65			
SPEEDS (kn): 110 120 130 130			
DEP ROT's (s): 34 34 45 45			
Wake Vortex Separations (nm)			
1.9	1.9	1.9	1.9
2.7	1.9	1.9	1.9
2.7	1.9	1.9	1.9
4.1	3.2	3.2	2.7
Minimum Time Between Departures (s)			
50	60	60	60
50	50	60	60
50	50	60	60
120	120	120	90
Length of Common Path: 7 7 7 7 nm			
ARR-DEP SEPARATION: 0 nm			
ARRIVAL R.O.T. Std. Dev.: 4 s			
INTER-ARRIVAL TIME Std. Dev.: 18 s			
DEPARTURE R.O.T. Std. Dev.: 0 s			
CLEARED-TO-ROLL Std. Dev.: 0 s			

ARR	DEP	TOTAL ARR	TOTAL DEP	CAPACITY
1	38	4	42	90
2	38	13	51	75
3	38	38	76	50
4	38	58	96	40
5	19	58	77	25
6	0	58	58	0

IMC Arrival - Departure Capacity Frontier

Analytical Capacity models

Capacidad de pista

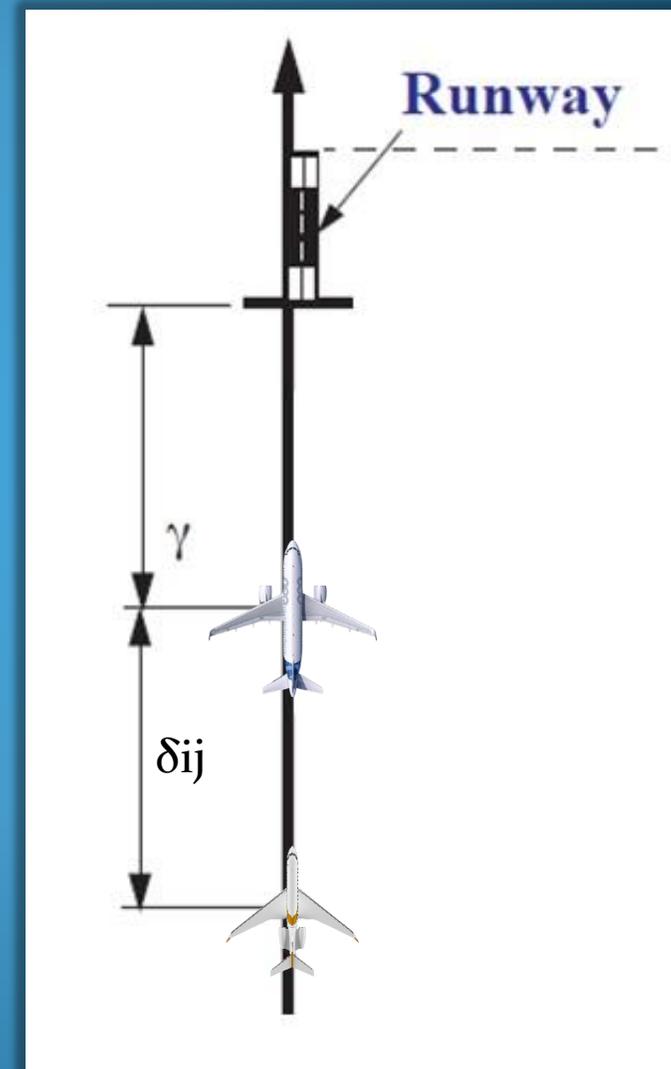
Método analítico (Arribos)

Requerimientos de análisis

- Mix de aeronaves.
- Velocidades de aproximación (V).
- Configuración de pista.
- Longitud de senda de aproximación (γ).
- Separaciones entre arribos (δ_{ij}).

Objetivo

Encontrar el tiempo medio ente arribos a fin de determinar al capacidad.



Capacidad de pista

Métodos analítico (Arribos)

- Caso Apertura, $V_i > V_j$



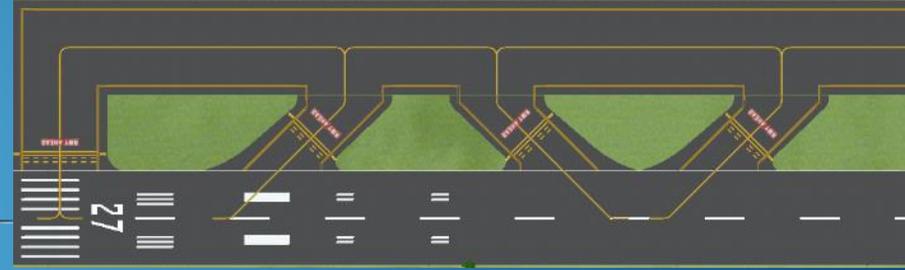
Tiempo entre Arribos

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

Capacidad de pista

Métodos analítico (Arribos)

- Caso Acercamiento, $V_j \geq V_i$



γ



δ_{ij}

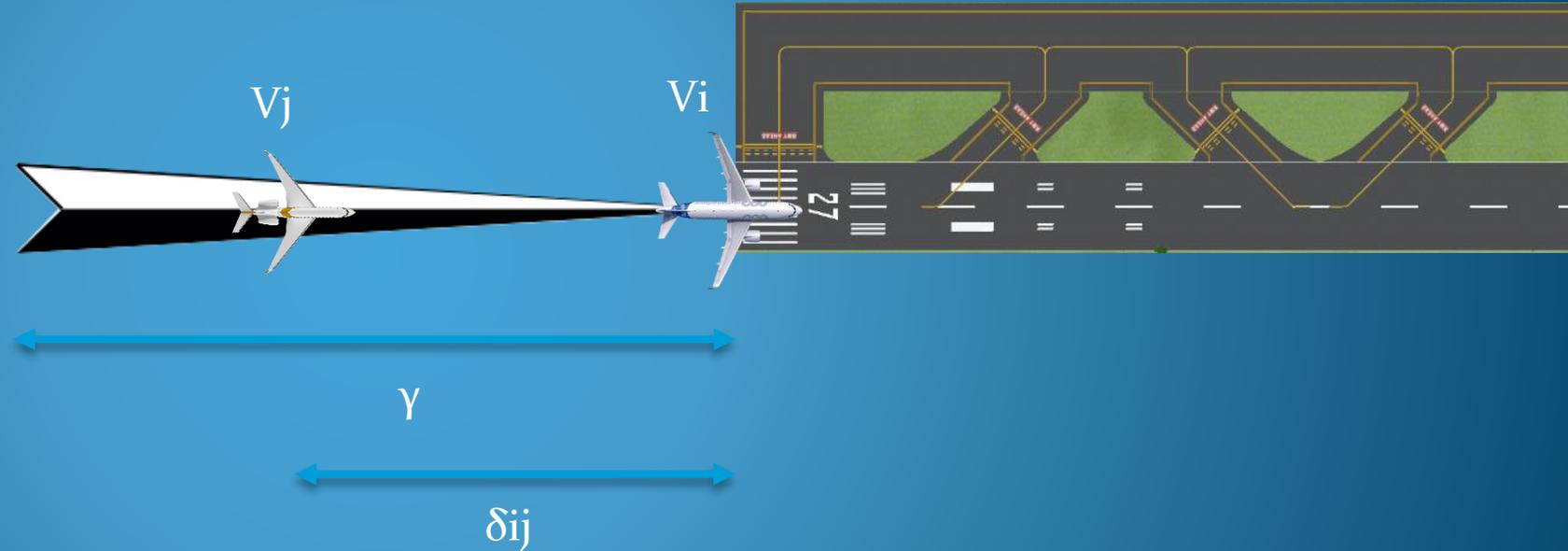
Tiempo entre Arribos

$$T_{ij} = T_j - T_i = \frac{\delta_{ij}}{V_j}$$

Capacidad de pista

Métodos analítico (Arribos)

- Caso Acercamiento $V_j \geq V_i$



Tiempo entre Arribos

$$T_{ij} = T_j - T_i = \frac{\delta_{ij}}{V_j}$$

En este caso, sólo nos interesa que la aeronave V_j , se encuentre a una distancia de seguridad δ_{ij} , la cual permita que aterricen ambas aeronaves con seguridad.

Capacidad de pista

Métodos analítico (Arribos)

- Buffer de seguridad.

La separación entre aeronaves δ_{ij} no es exacta en todo momento, por lo que se adiciona un tiempo de separación estadístico extra al tiempo entre arribos

- $b_{ij} = \sigma * q(pv) \quad (V_j \geq V_i)$

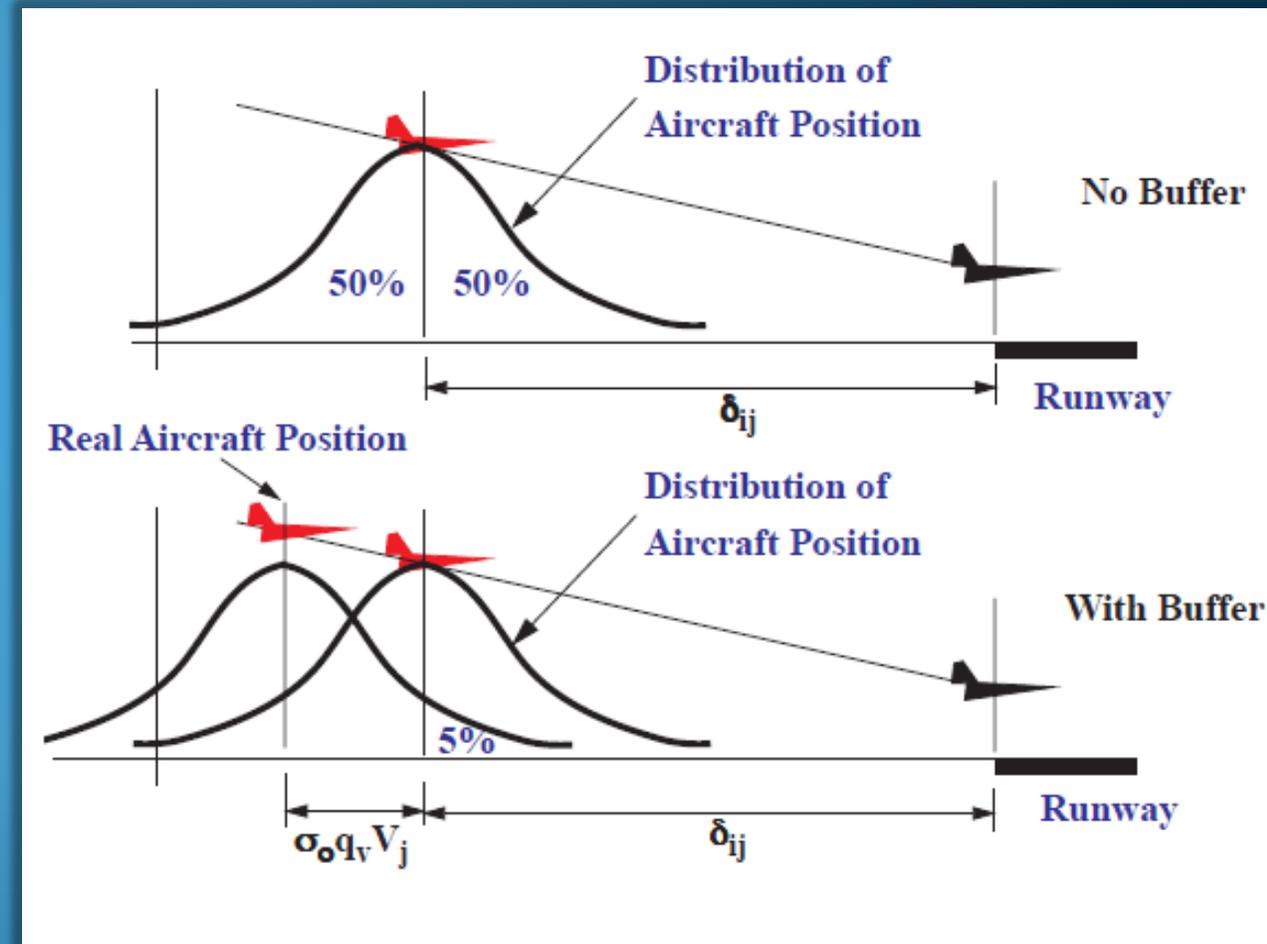
- $b_{ij} = \sigma * q(pv) - \delta_{ij} \left(\frac{1}{V_j} - \frac{1}{V_i} \right) \quad (V_j < V_i)$

$Si \ b_{ij} < 0, \ b(ij) = 0$

σ [s]: desviación estándar del error de posición de la aeronave.

$q(pv)$: valor para el cual la distribución normal acumulativa toma el valor $(1 - pv)$.

pv : representa la probabilidad de violación de las reglas mínimas aceptables de separaciones (5%).



Capacidad de pista

Métodos analítico (Arribos)

$$E(t) = \sum_i \sum_j [T_{ij} + b_{ij}] * P_{ij} \text{ [Tiempo entre arribos]}$$

P_{ij} : probabilidad de ocurrencia.

$$C = \frac{1}{E(t)} : \text{Capacidad [Operaciones por segundo.]}$$

$$C = \frac{3600}{E(t)} : \text{Capacidad [Operaciones por hora.]}$$

Capacidad de pista

Métodos analítico (Arribos)

➤ Ejercicio.

Datos:

➤ Aeronaves:

A) 120 Knots, 40%.

B) 150 Knots, 60%.

➤ γ : 7 Nm.

➤ δ_{ij} : 3 Nm.

➤ σ : 20s.

➤ $P_v = 5\%$ o 0,05

➤ $q(pv) = q(1 - pv) = 1,65$

Valor extraído por estadística: campana de Gauss.

Matriz T_{ij} (Tiempos entre arribos)

Tiempos entre arribos		Aeronave "J"	
		120 Kts	150 Kts
Aeronave "i"	120 Kts	90 s	72 s
	150 Kts	132 s	72 s

$$T_{11} = \frac{3 Nm}{120 Knots} * 3600 s.$$

$$T_{21} = \left[\frac{3Nm}{120 Knots} + 7Nm \left(\frac{1}{120 Knost} - \frac{1}{150 Knots} \right) \right] * 3600s.$$

Capacidad de pista

Métodos analítico (Arribos)

➤ Ejercicio.

Datos:

➤ Aeronaves:

A) 120 Knots, 40%.

B) 150 Knots, 60%.

➤ γ : 7 Nm.

➤ δ_{ij} : 3 Nm.

➤ σ : 20s.

➤ $P_v = 5\%$ o 0,05

➤ $q(pv) = q(1 - pv) = 1,65$

Valor extraído por estadística: Campana de Gauss

Matriz b_{ij} (Buffer adicionado)

Tiempos de Buffer		Aeronave "J"	
		120 Kts	150 Kts
Aeronave "i"	120 Kts	33 s	33 s
	150 Kts	15 s	33 s

$$b_{11} = 20 \text{ s} * 1,65 = 33 \text{ s}$$

$$b_{21} = 20 \text{ s} * 1,65 \text{ s} - 3 \text{ Nm} (1/120 \text{ Kts} - 1/150 \text{ Kts}) * 3600 = 15 \text{ s}$$

Capacidad de pista

Métodos analítico (Arribos)

➤ Ejercicio.

Datos:

➤ Aeronaves:

A) 120 Knots, 40%.

B) 150 Knots, 60%.

➤ γ : 7 Nm.

➤ δ_{ij} : 3 Nm.

➤ σ : 20s.

➤ $P_v = 5\%$ o 0,05

➤ $q(pv) = q(1 - pv) = 1,65$

Valor extraído por estadística: Campana de Gauss

Matriz P_{ij} (Probabilidades)

Probabilidades		Aeronave "J"	
		120 Kts	150 Kts
Aeronave "i"	120 Kts	0,16	0,24
	150 Kts	0,24	0,36

$$P_{11} = 0,4 * 0,4 = 0,16$$

$$P_{21} = 0,6 * 0,4 = 0,24$$

Capacidad de pista

Métodos analítico (Arribos)

Tiempos entre arribos [Tij + bij]		Aeronave "J"	
		120 Kts	150 Kts
Aeronave "i"	120 Kts	123 s	105 s
	150 Kts	147 s	105 s

Probabilidades [Pij]		Aeronave "J"	
		120 Kts	150 Kts
Aeronave "i"	120 Kts	0,16	0,24
	150 Kts	0,24	0,36

$$E(t) = \sum_i \sum_j [Tij + bij] * Pij = 123*0,16+105*0,24+147*0,24+105*0,36$$

$$E(t) = 117,96 \text{ s/Op}$$

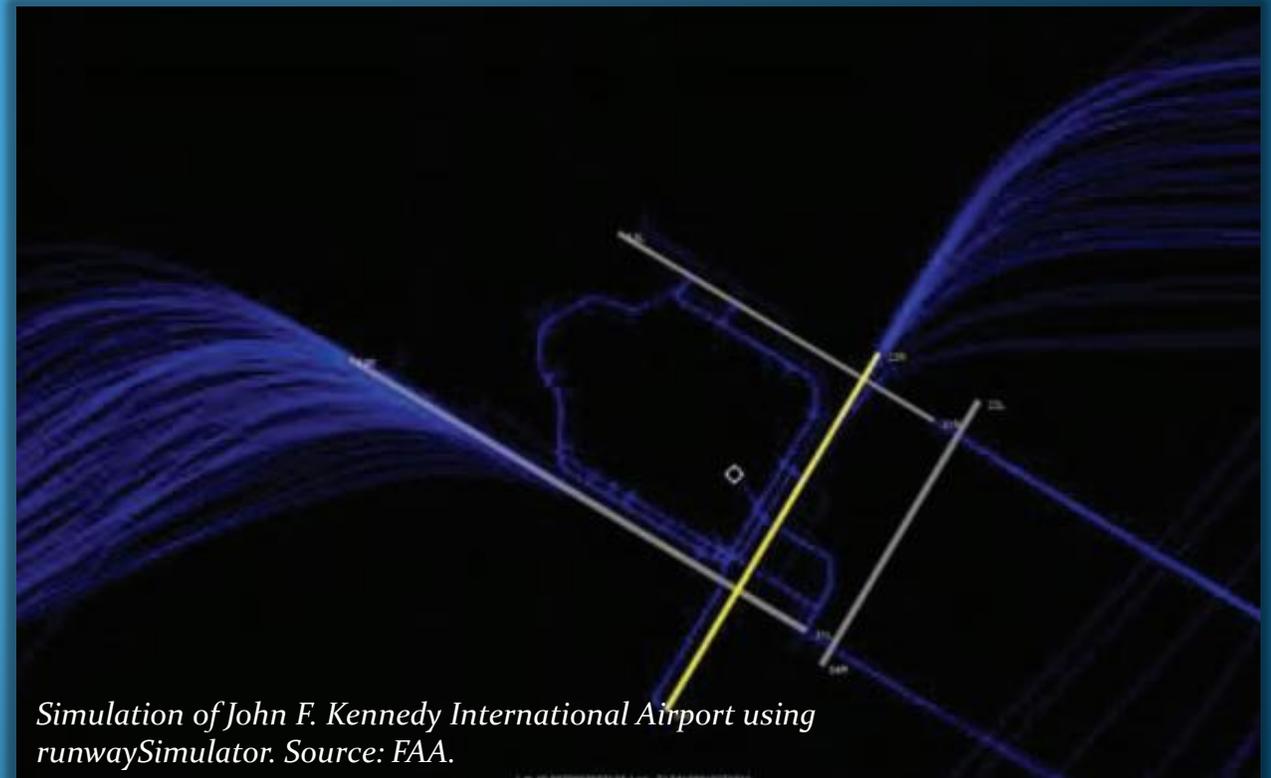
$$C = 3600\text{s}/117,96 \text{ s/Op} = 30 \text{ Op.}$$

Capacidad de pista

Métodos por Simulación:

La simulación o simulación por ordenador, es una herramienta que intenta modelizar sistemas reales o hipotéticos aplicando técnicas matemáticas, de manera que su funcionamiento puede ser estudiado a fin de predecir su comportamiento. Para aplicar estos métodos es necesario contar con el diseño del AD y estadísticas de las variables a analizar:

- Layout del AD.
- Mix de aeronaves.
- Velocidad de aeronaves.
- Tiempos entre arribos.
- Tiempos de Ocupación de pista.
(Despegues y Arribos)
- Distancias/tiempos mínimos para despegar aeronaves entre arribos.



Simulation of John F. Kennedy International Airport using runwaySimulator. Source: FAA.

Capacidad de pista



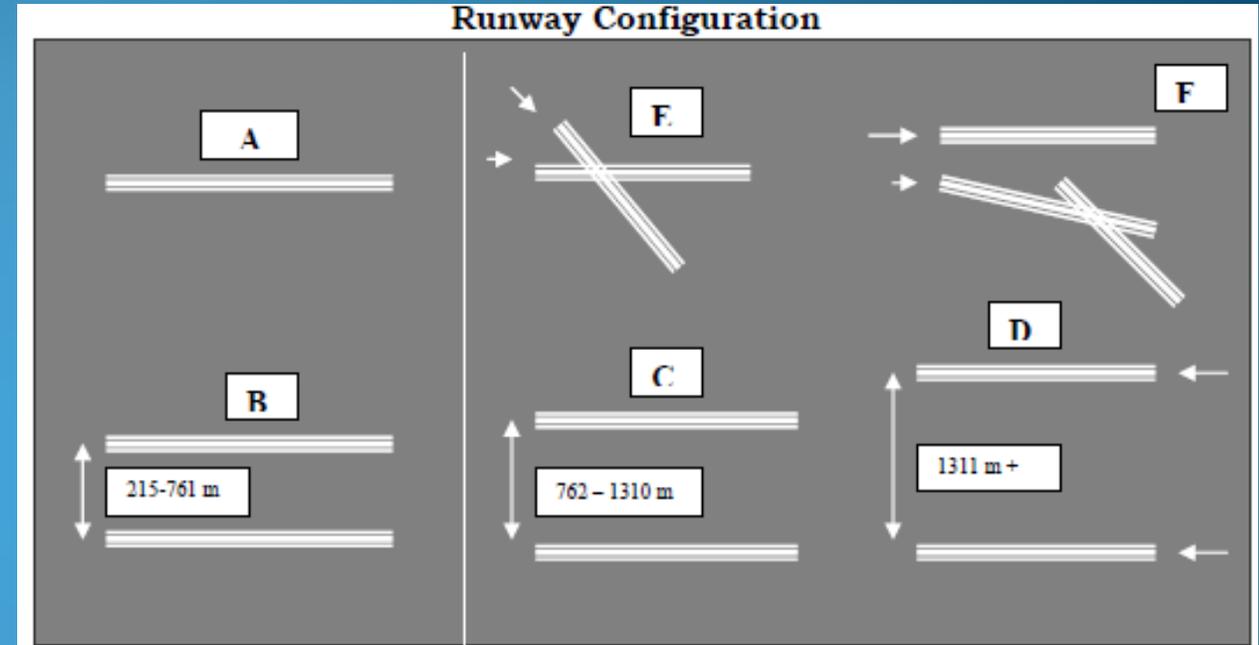
Capacidad, Demora y Demanda.

Cátedra : Aeropuertos, Aeronavegación e Impacto Ambiental (A3I) FRH-UTN.

Capacidad de pista

Consideraciones para el diseño de pistas

“La configuración de pista define los posibles modo de operación, y el modo de operación define la capacidad de pista”.



Source - ICAO Airport Planning Manual, 1987

Runway Classification	Hourly Capacity - (Ops / Per hour)		Annual Volume Ops/ Per hour
	VFR	IFR	
A	51-98	50-59	195000-240000
B	94-197	56-60	260000-355000
C	103-197	62-75	275000-365000
D	103-197	99-119	305000-370000
E	72-98	56-60	200000-265000
F	73-150	56-60	220000-270000

Capacidad de pista

Consideraciones para el diseño de pistas

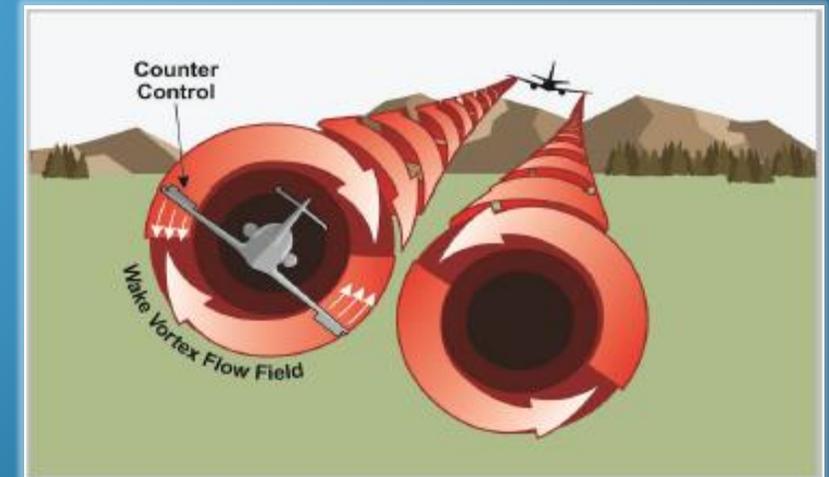
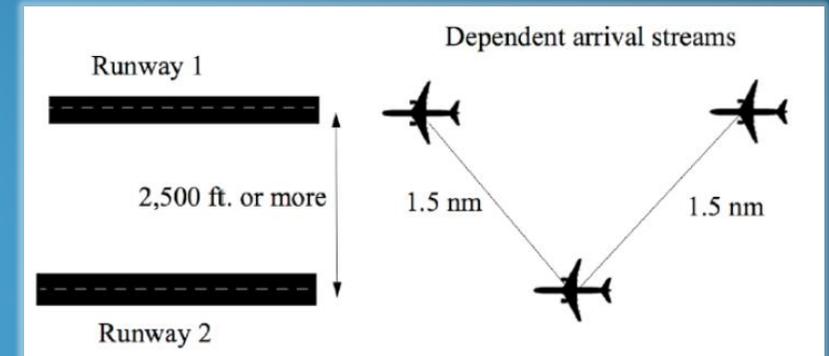
Pistas paralelas (Doc 9157 Part 1):

2.1.16 *VMC operations.* Where parallel runways are provided for simultaneous use under visual meteorological conditions only, the minimum distance between their centre lines should be:

- a) 210 m where the higher code number is 3 or 4;
- b) 150 m where the higher code number is 2; and
- c) 120 m where the higher code number is 1.

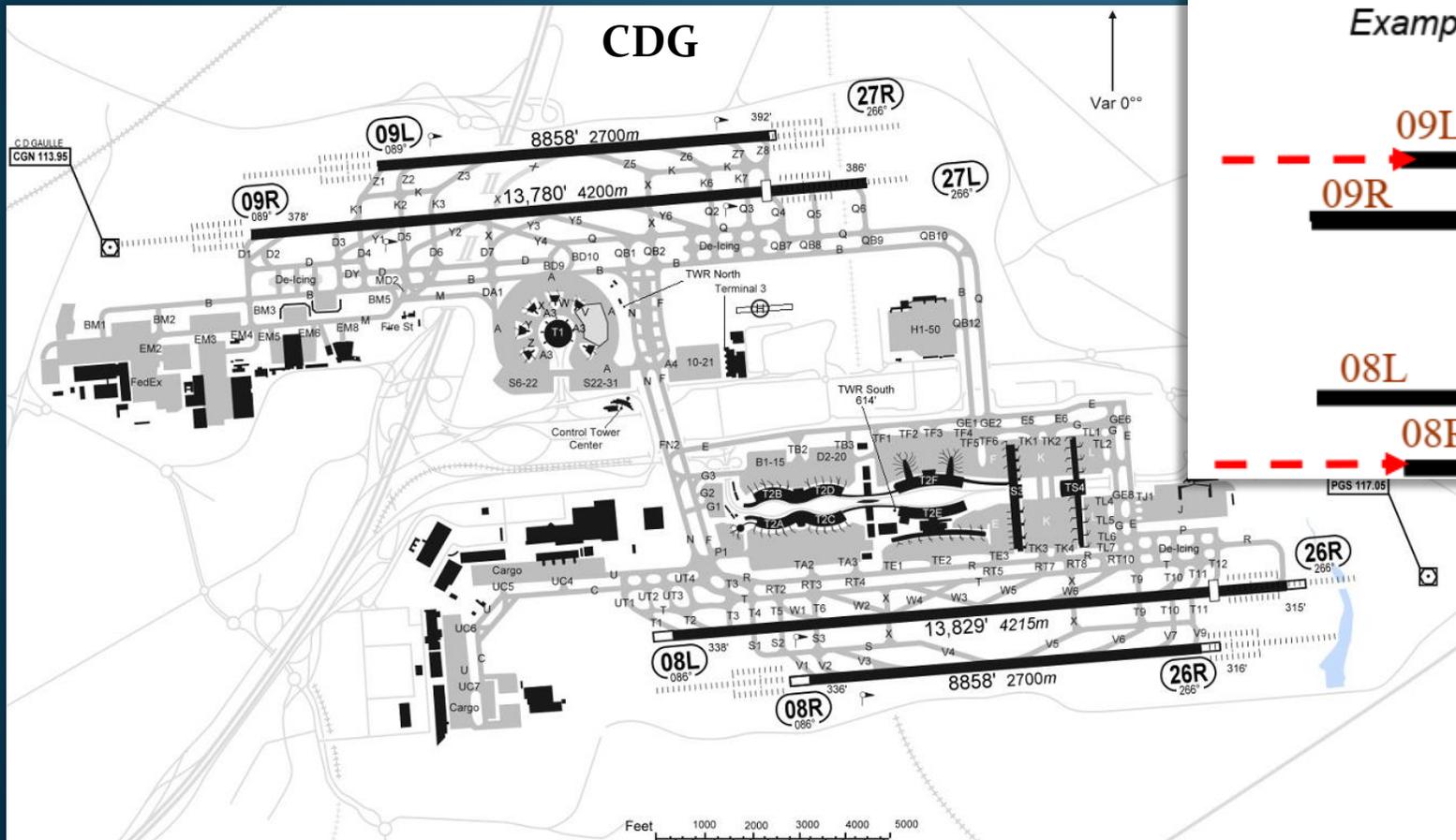
2.1.17 *IMC operations.* Where parallel runways are provided for simultaneous operations under instrument meteorological conditions (IMC), the minimum separation distance between their centre lines should be:

- a) 1 035 m for independent parallel approaches;
- b) 915 m for dependent parallel approaches;
- c) 760 m for independent parallel departures;
- d) 760 m for segregated parallel operations;



Capacidad de pista

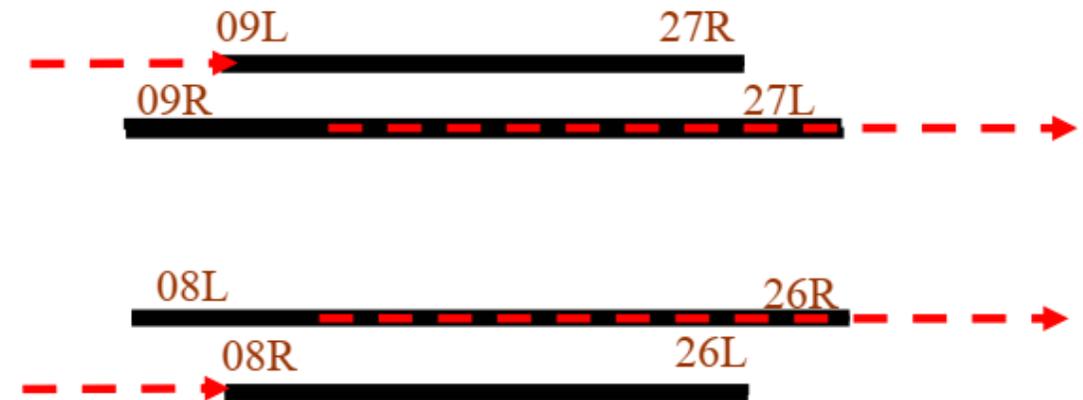
Modos de operación: Pistas paralelas (CDG)



➤ Departures on inner runways

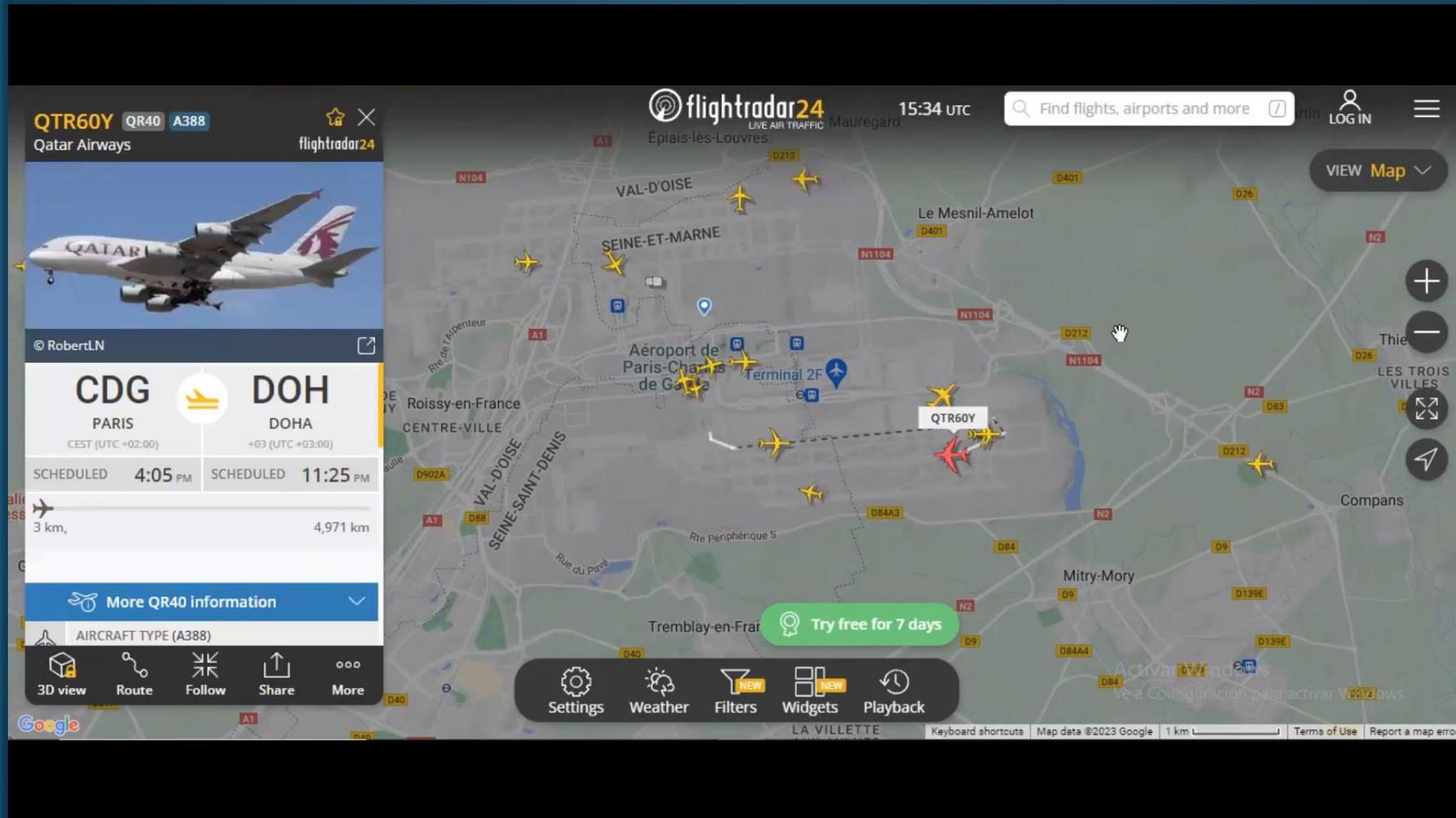
➤ Arrivals on outer runways

Example : facing east conditions



Capacidad de pista

Modos de operación: *Pistas paralelas (CDG)*

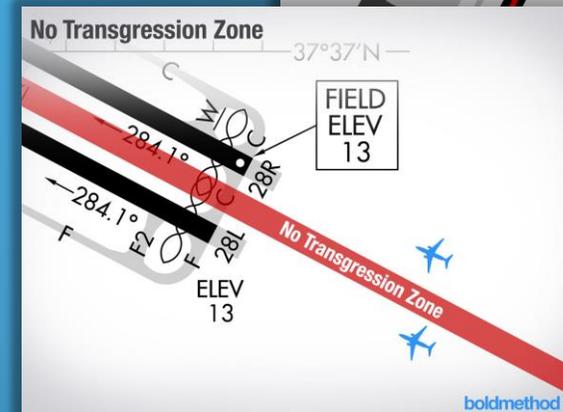
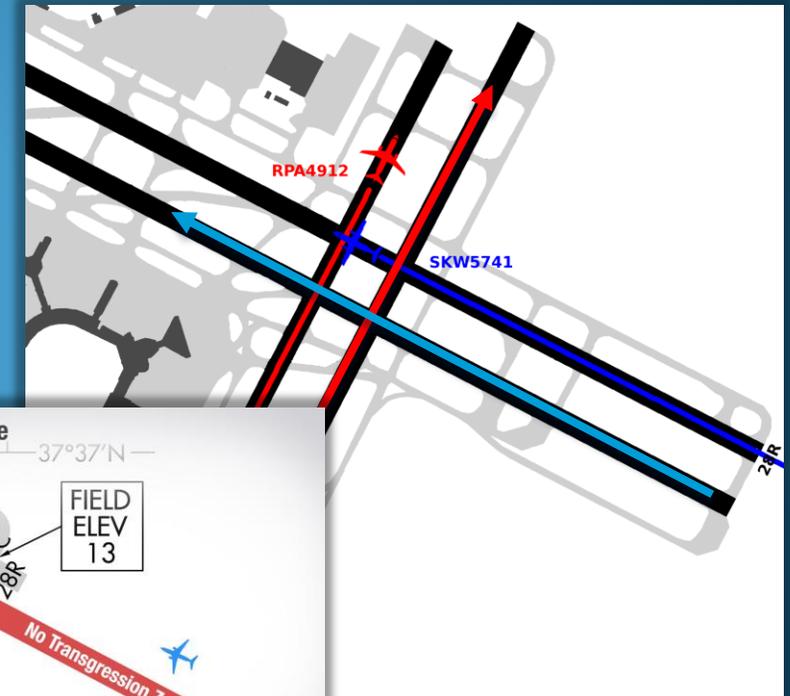
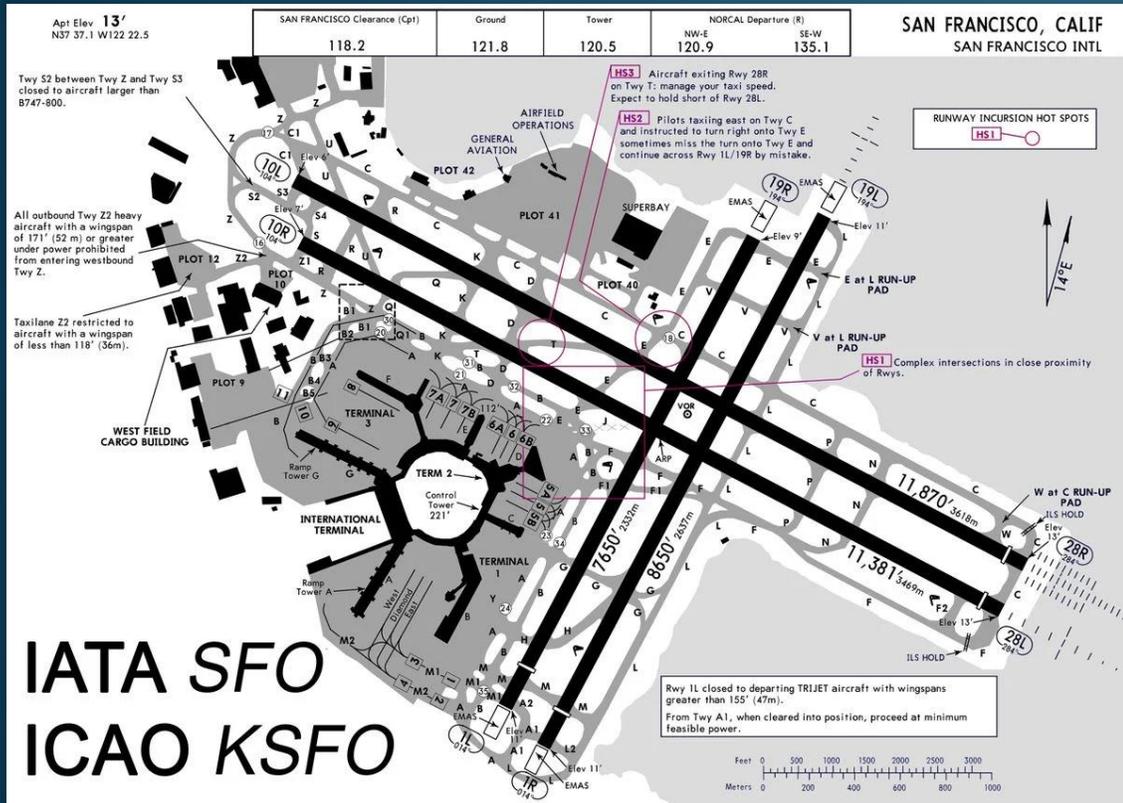


Capacidad, Demora y Demanda.

Cátedra : Aeropuertos, Aeronavegación e Impacto Ambiental (A3I) FRH-UTN.

Capacidad de pista

Modos de operación: Pistas paralelas (SFO)



Simultaneous Offset Instrument Approach (SOIA) is a procedure used to conduct simultaneous approaches to runways spaced less than 3,000' (915m), but at least 750' (230m) apart.

Capacidad de pista

Modos de operación: Pistas paralelas (SFO)

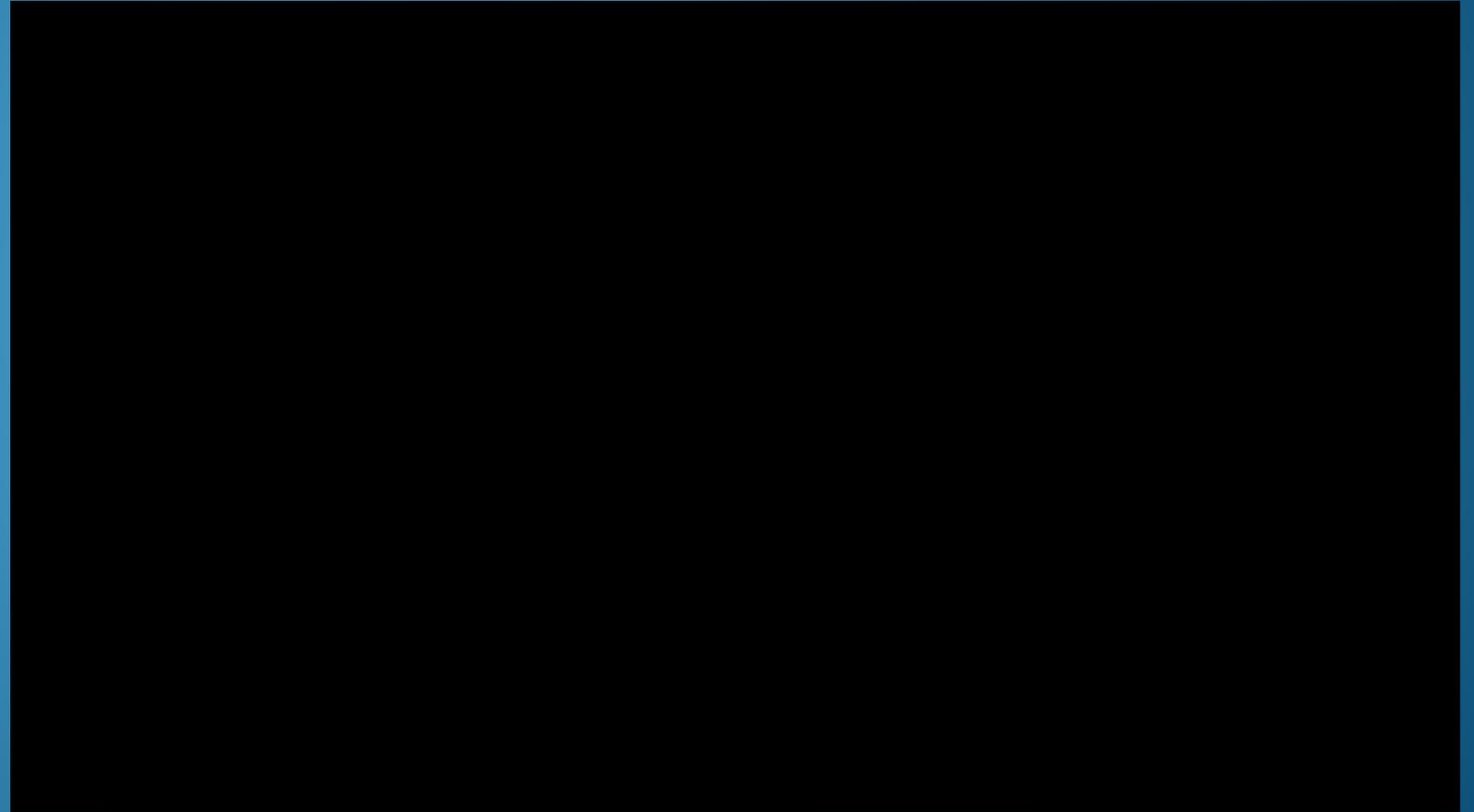


Capacidad de pista

Modos de operación: Pistas paralelas (SFO)

Simultaneous Offset Instrument Approach (SOIA) is a procedure used to conduct simultaneous approaches to runways spaced less than 3,000' (915m), but at least 750' (230m) apart. The SOIA procedure utilizes an ILS PRM approach to one runway and an offset Localizer Type Directional Aid (LDA) PRM approach with glide slope or an RNAV PRM or GLS PRM approach utilizing vertical guidance to the adjacent runway. SOIA require No Transgression Zone (NTZ) monitoring, special pilot training and a dedicated Attention.

2 VHF simultaneous frequencies are selected (TWR and PRM APP)



Capacidad de Gates

El término “Gate” designa un espacio de estacionamiento de aeronaves adyacente a un edificio de la terminal y utilizado por una sola aeronave para la carga y descarga de pasajeros, equipaje y correo o un puesto de estacionamiento remoto en la plataforma donde los pasajeros y el equipaje se transfieren a la terminal. La capacidad de Gates se refiere a la capacidad de un número específico de puertas para acomodar las operaciones de carga y descarga de aeronaves en condiciones de demanda continua. Es el inverso del tiempo medio ponderado de ocupación de la puerta de todas las aeronaves atendidas.

Método analítico:

➤ $C_{Gate} = \frac{G}{\sum T_k * P_k}$ Si no hay restricción de aeronaves en determinados Gates.

G: Número de posiciones.

P: Proporción de aeronaves (%).

T: Tiempo medio de permanencia en el Gate.

k: aeronaves de una determinada clasificación asignada.

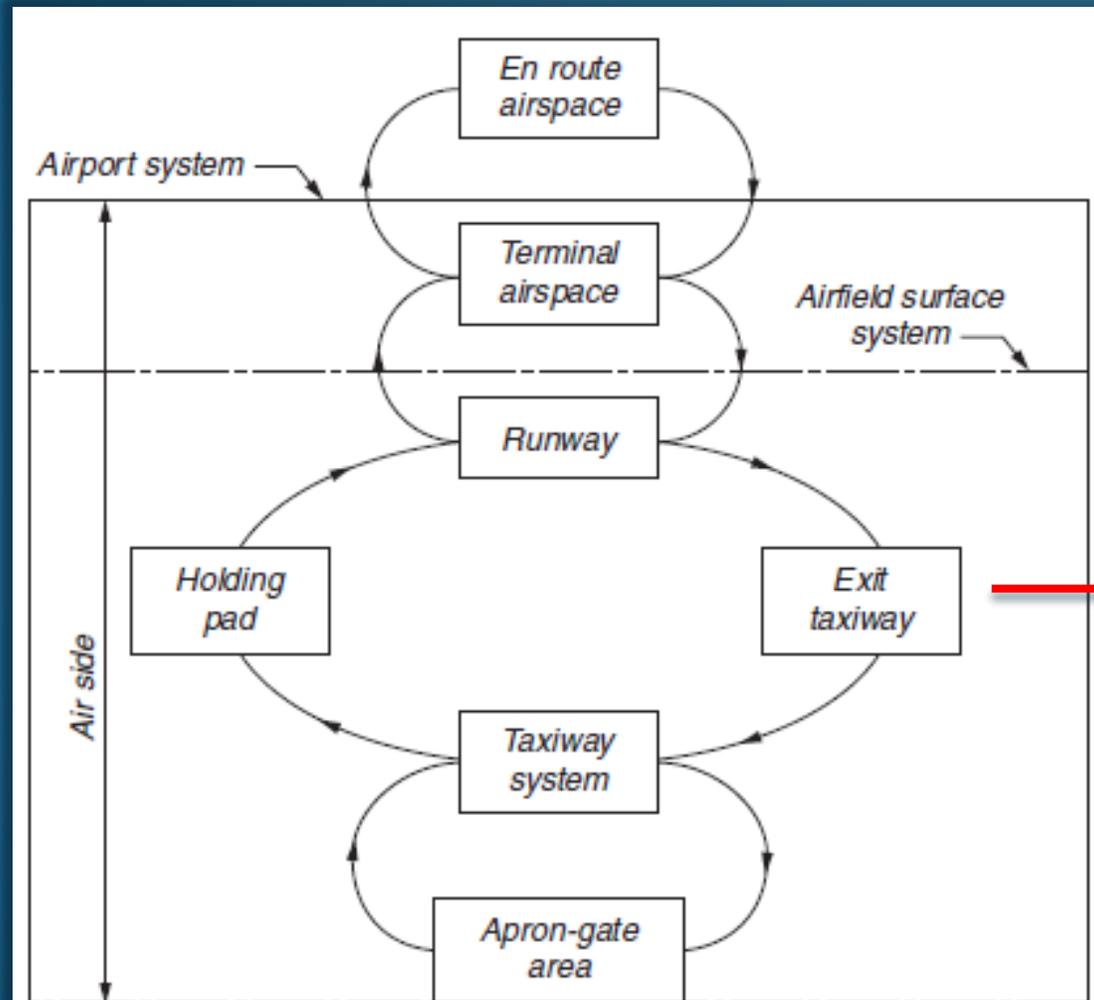
*AIRPORT SYSTEMS (PLANNING,
DESIGN & MANAGEMENT) BY
RICHARD DE NEULVILLE*

→ Total gates required = $G + G^* = G + \sqrt{G}$

Uncertainty, Daily Variation



Capacidad lado Aire



Airfield capacity
 $\text{Min}[C_{\text{Runway}}, C_{\text{Apron}}]$

Capacidad lado Aire

Para diagramar el área terminal, se requiere estimar la cantidad de pasajeros que podría arribar/salir al aeropuerto.

Por lo que se recomienda analizar el Factor de ocupación del vuelo (Load Factor) a fin de dimensionar la superficie necesaria para cada servicio en el AD.

Table 4.8. Characteristics of the complexes of flights at the Frankfurt Main airport (Germany)

Flight category	Fights per category	Market(s)	Aircraft type	Average capacity (seats) \bar{N}	Average load factor (%) $\bar{\lambda}$
1	16	Germany, The closest EU ⁵	CRJs 100/200/700, Avro Rj85	77	61.0
2	12	Central EU, central Europe	B737, A319/320/321	135	61.0
3	12	Scandinavia	B737, A320/321	135	61.0
4	12	Mediterranean and Eastern Europe	A319/320/321	154	61.0
5	8	Middle East and Russia	A300/A310, B757	246	71.3
6	8	North America-East Coast, India	A310/340	246	80.1
7	3	North America- Central, Africa	B747, A340	318	76.0
8	8	South America, North America-West Coast, Japan, South-East Asia	B747, A340	318	79.2

Compiled from: Lufthansa, 2003.

Demoras

La demora puede definirse como el incremento del tiempo necesario para realizar una operación a partir de operaciones planificadas en condiciones "normales/optimas". El tiempo adicional requerido puede representarse como una "cola o espera" para realizar una operación, o una reducción en la velocidad de un trayecto debido a la congestión. Las demoras están estrechamente ligadas a la "Demanda".

En el caso de los Aeropuertos, la demanda puede ser definida como aquellas entidades dispuestas a adquirir sus servicios, considerando una unidad de tiempo determinada. Los aeropuertos que operan con un cronograma de vuelos prestablecido, se evidencia que tan pronto como la Demanda excede su capacidad, emergen problemas de "Congestione y las demoras".

Es este estudio sólo se abordará el estudio de las Demoras en Pista, permitiéndonos determinar una valor aproximado de la Capacidad práctica.

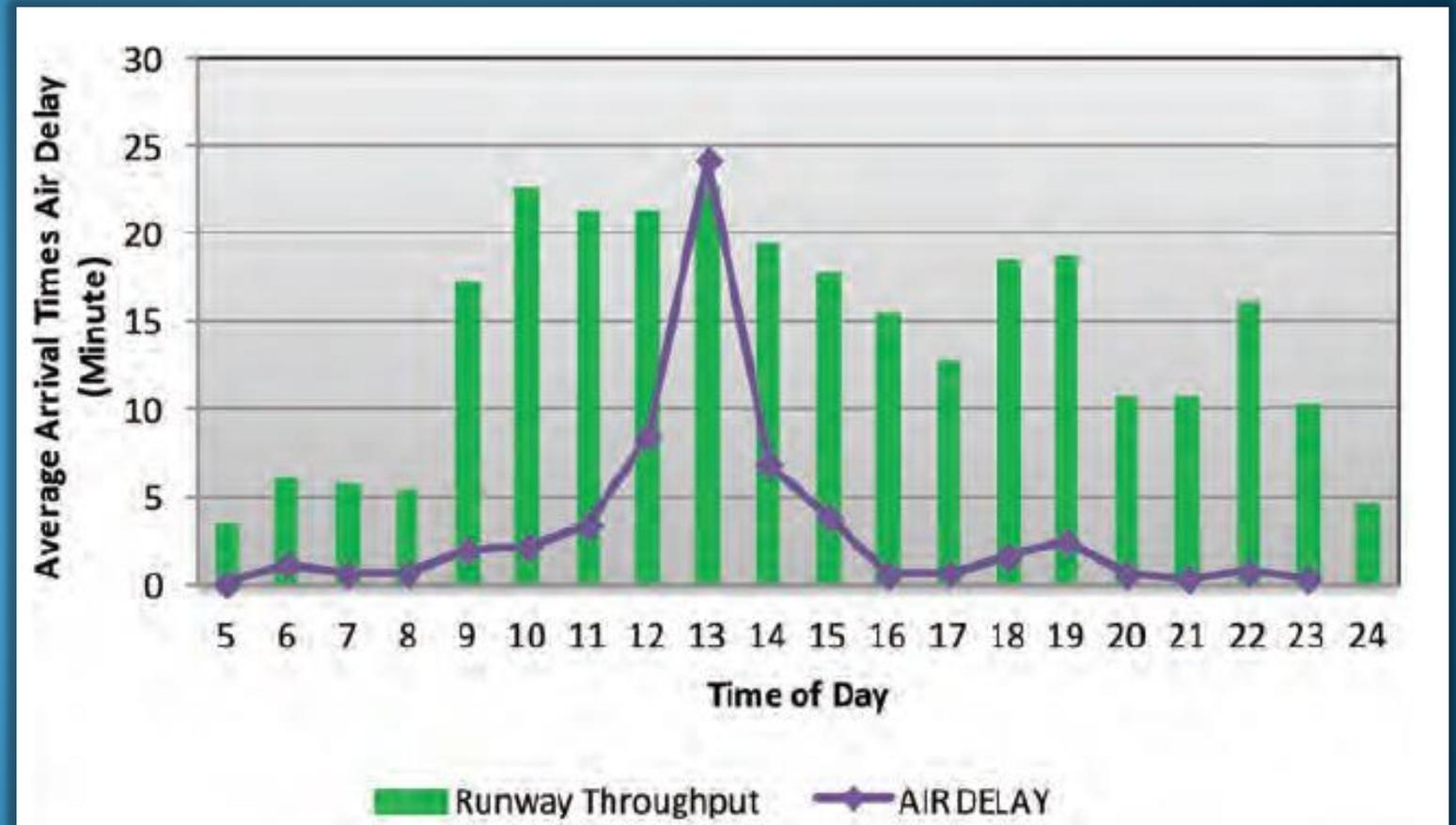
Para estimar la demora se emplean varias aproximaciones, a saber:

- Enfoque empírico.
- Modelos de espera/colas.
- FAA AC 150/5060-5, "Airport Capacity and Delay".

Demoras

ENFOQUE EMPIRICO

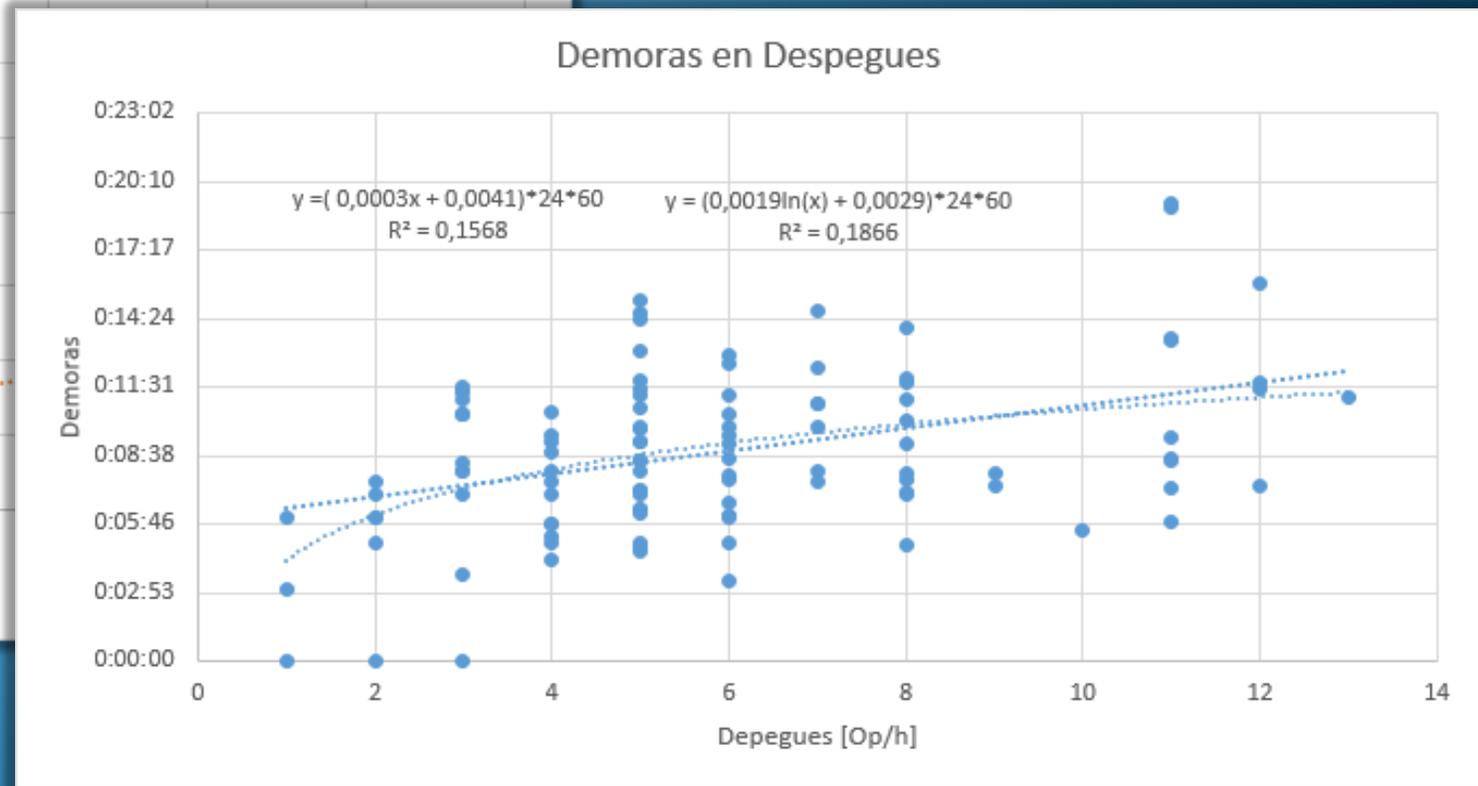
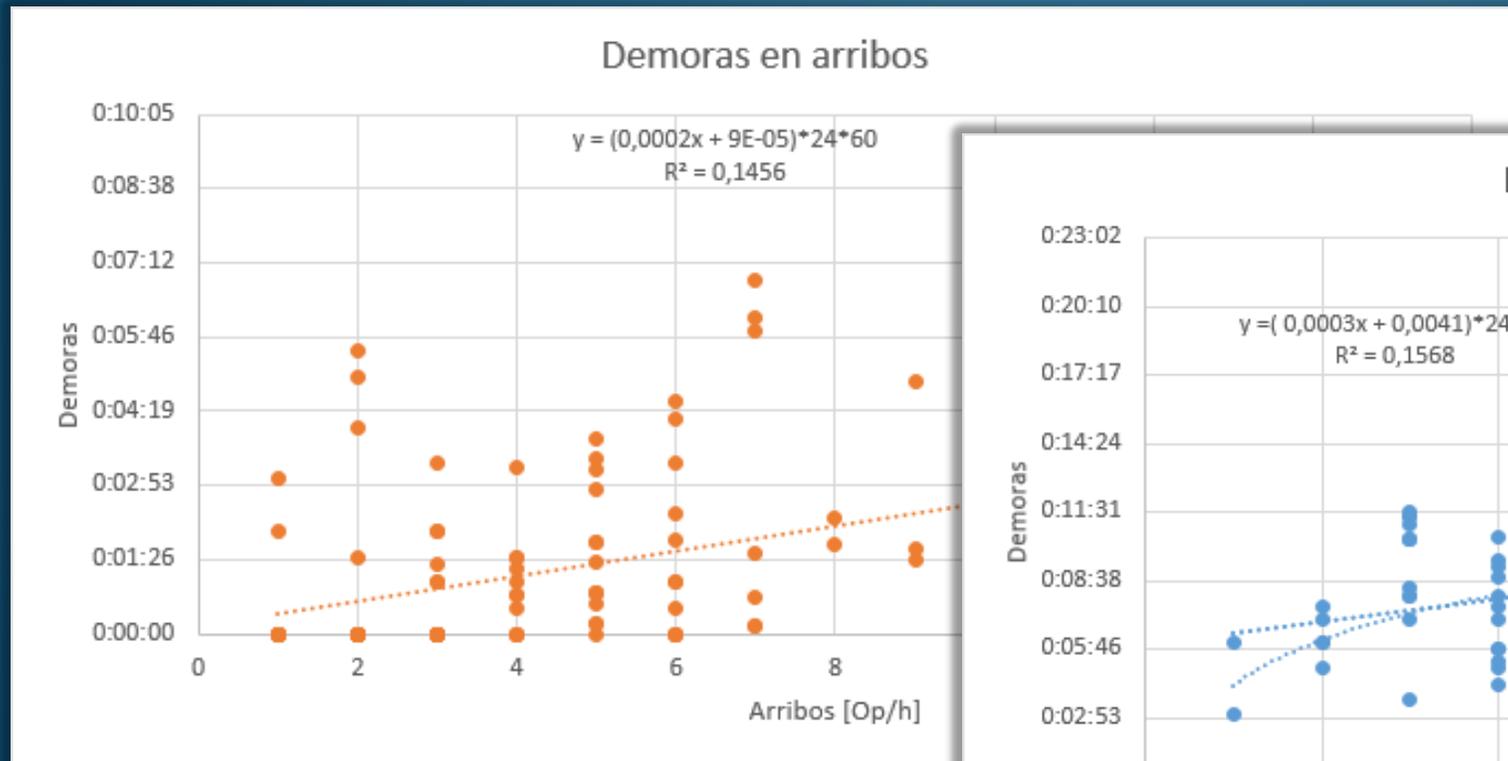
Se basa sobre las estimaciones de capacidad y demora sobre los resultados de encuestas operativas realizadas en aeropuertos existentes. Dichas encuestas pueden utilizarse como base para generar gráficos y tablas a partir de los cuales se realizan estimaciones de capacidad.



Demoras

ENFOQUE EMPIRICO

➤ SABE (datos del 8 al 16 Marzo del 2020).



Demoras

ENFOQUE EMPIRICO

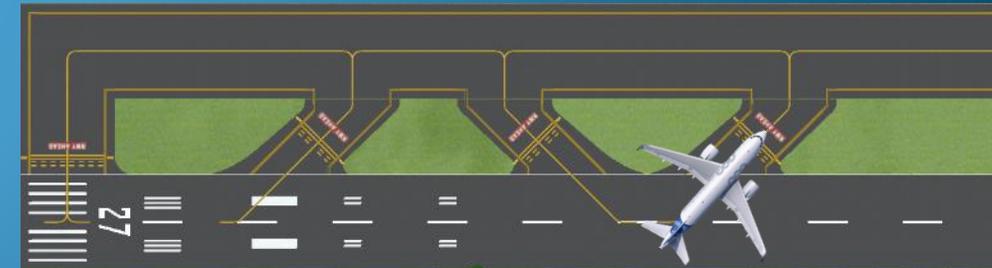
From 2012 To 2013 : 'SFO': (Calendar Year)

Local Hour	Scheduled Departures	Scheduled Arrivals	Departures For Metric Computation	Arrivals For Metric Computation	% On-Time Gate Departures	% On-Time Airport Departures	% On-Time Gate Arrivals	Gate Departure Delay	Taxi-Out Delay	Airport Departure Delay	Airborne Delay	Taxi-In Delay	Block Delay	Gate Arrival Delay
0	2263	1981	2008	2465	77.59	73.51	77.08	9.78	2.54	11.73	2.16	2.18	2.89	11.41
1	1770	281	1341	585	88.59	85.31	79.66	5.90	2.06	8.18	1.66	1.47	2.11	10.19
2	450	0	332	72	82.53	78.61	75	8.20	1.67	10.04	2.51	1.37	3.17	12.97
3	184	303	175	347	84	80	83.00	8.37	1.12	9.73	0.30	1.31	0.80	6.81
4	281	681	181	790	51.93	49.17	82.15	30.81	2.56	33.68	0.80	0.72	1.57	7.32
5	1125	790	1371	1180	84.76	76.08	78.47	8.39	4.17	11.95	0.94	1.60	2.17	8.57
6	13475	4356	13411	4532	92.91	85.22	91.62	4.01	5.44	7.78	2.84	2.25	2.39	4.52
7	14690	10391	15481	10128	87.93	81.53	90.43	6.29	4.84	9.66	3.66	3.79	2.93	5.12
8	18289	12309	18404	11937	87.89	80.36	83.98	6.13	4.98	9.72	2.71	4.09	3.36	8.87
9	15529	19688	15706	19464	85.08	77.59	76.90	7.44	4.81	10.90	3.74	3.45	4.12	13.84
10	18660	13607	18850	13573	78.22	66.76	71.33	10.87	5.73	15.58	3.91	3.81	4.26	18.59
11	14706	16795	14697	17260	75.35	64.61	73.62	11.71	5.59	16.33	3.33	3.35	3.57	15.72

Demoras

ENFOQUE DE LA TEORIA DE COLAS

Es un estudio empírico que surge de analizar el comportamiento de los arribos a un Aeropuerto, donde a pesar de contar con vuelos programados, las llegadas demuestran ser un proceso aleatorio más que regular. Considera el comportamiento de los arribos como un ***Distribución probabilística de Poisson***. Dada la naturaleza física del aeropuerto el modelo de cola aplicable es la cola espacialmente distribuida. Su forma básica es M/G/1, donde (M) se refiere al proceso de servicio interarribo Markoviano (Poisson-aleatorio), (G) se refiere a distribución de tiempo de servicio general, y (1) se refiere a que hay un servidor (pista).



Nota: Las aeronaves llegan con distintos tiempos de separación entre ellas.

Demoras

ENFOQUE DE LA TEORIA DE COLAS

➤ Matemática del modelo

$$W = \frac{\lambda(\sigma^2 + 1/\mu^2)}{2(1 - \lambda/\mu)} = \frac{\lambda(\sigma^2 + 1/\mu^2)}{2(1 - \rho)}$$

- W Demora Promedio por ACFT.
- λ Tasa de arribos [Op/h].
- σ Desvió estándar de la Tasa de servicio [s].
- μ Tasa de Servicio (Capacidad de Saturación)[Op/h].
- ρ Relación de la Tasa de Servicio/ Tasa de Arribos.

Modelo válido para $\rho \leq 1$.

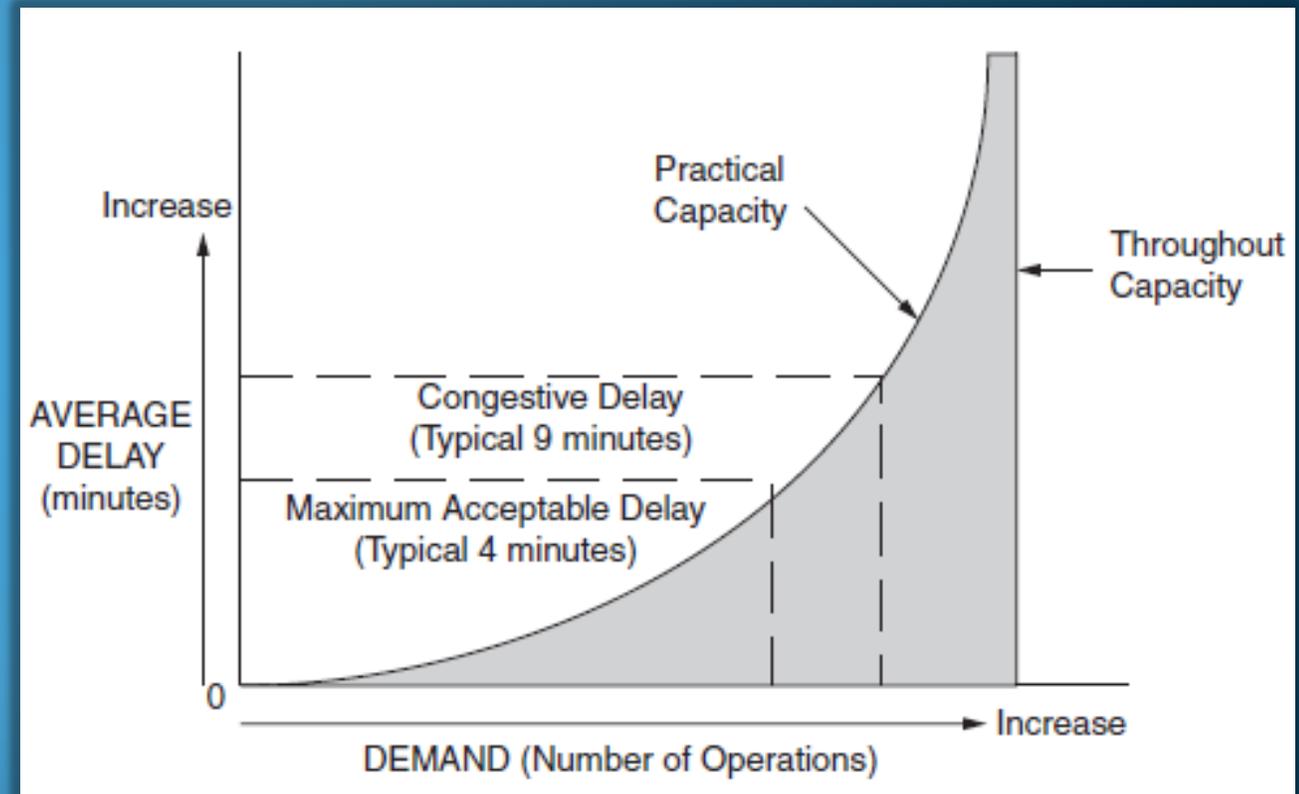
Demoras

ENFOQUE DE LA TEORIA DE COLAS

➤ Modelo

$$W = \frac{\lambda(\sigma^2 + 1/\mu^2)}{2(1 - \lambda/\mu)} = \frac{\lambda(\sigma^2 + 1/\mu^2)}{2(1 - \rho)}$$

- Demoras inferiores a 5 minutos por operación son tolerables.
- Demoras mayores de 10 minutos son un problema y existe una congestión.
- Demoras de más de 20 minutos indican que el aeropuerto está experimentando problemas de congestión severos.



Demoras

ENFOQUE DE LA TEORIA DE COLAS

➤ Ejercicio

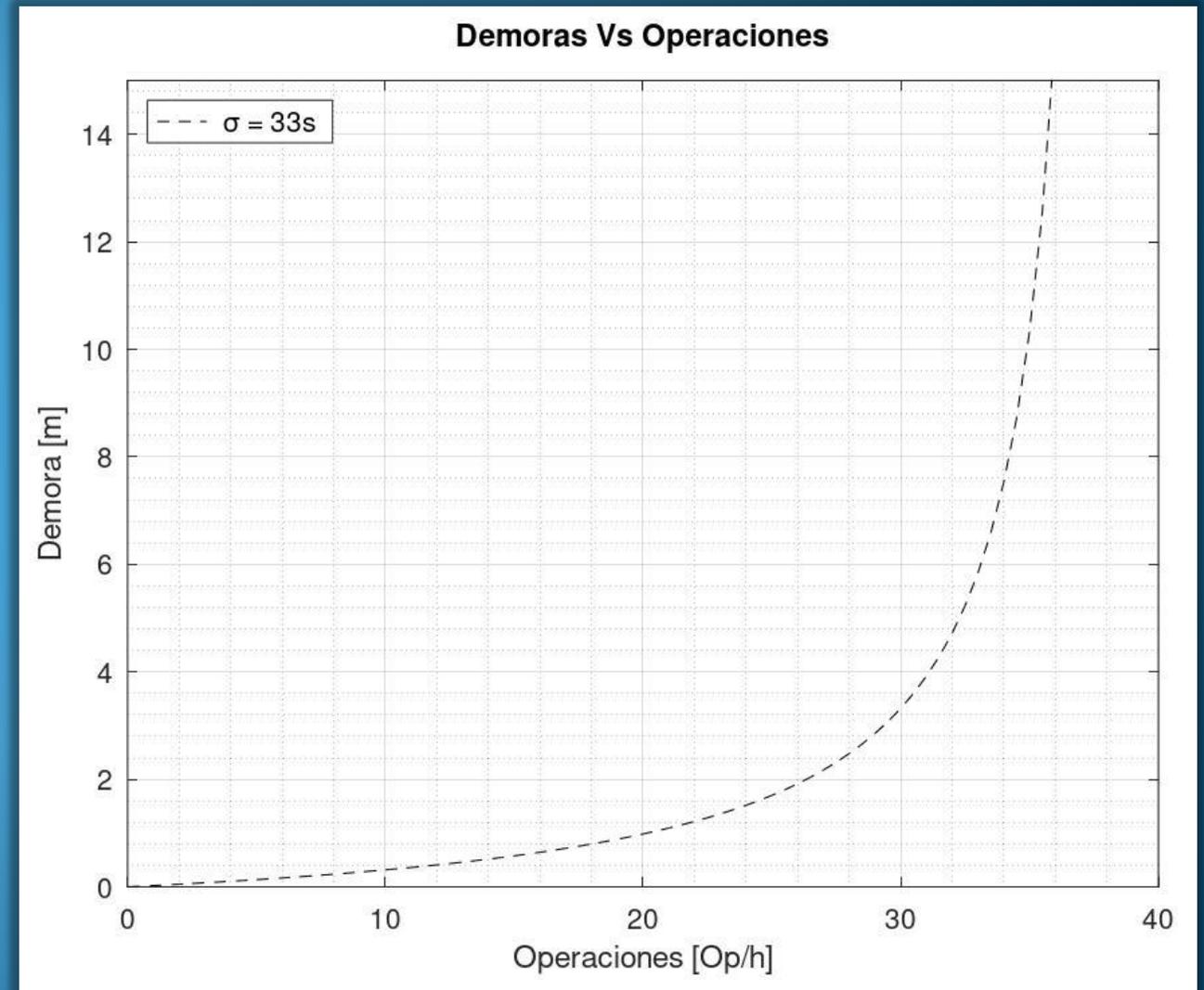
$$W = \frac{\lambda(\sigma^2 + 1/\mu^2)}{2(1 - \lambda/\mu)}$$

- λ : 0, 10, 20, 30 y 34 Op/h.
- μ : 38 Op/h.
- σ : 33 s/Op.

Determinar:

W en minutos.

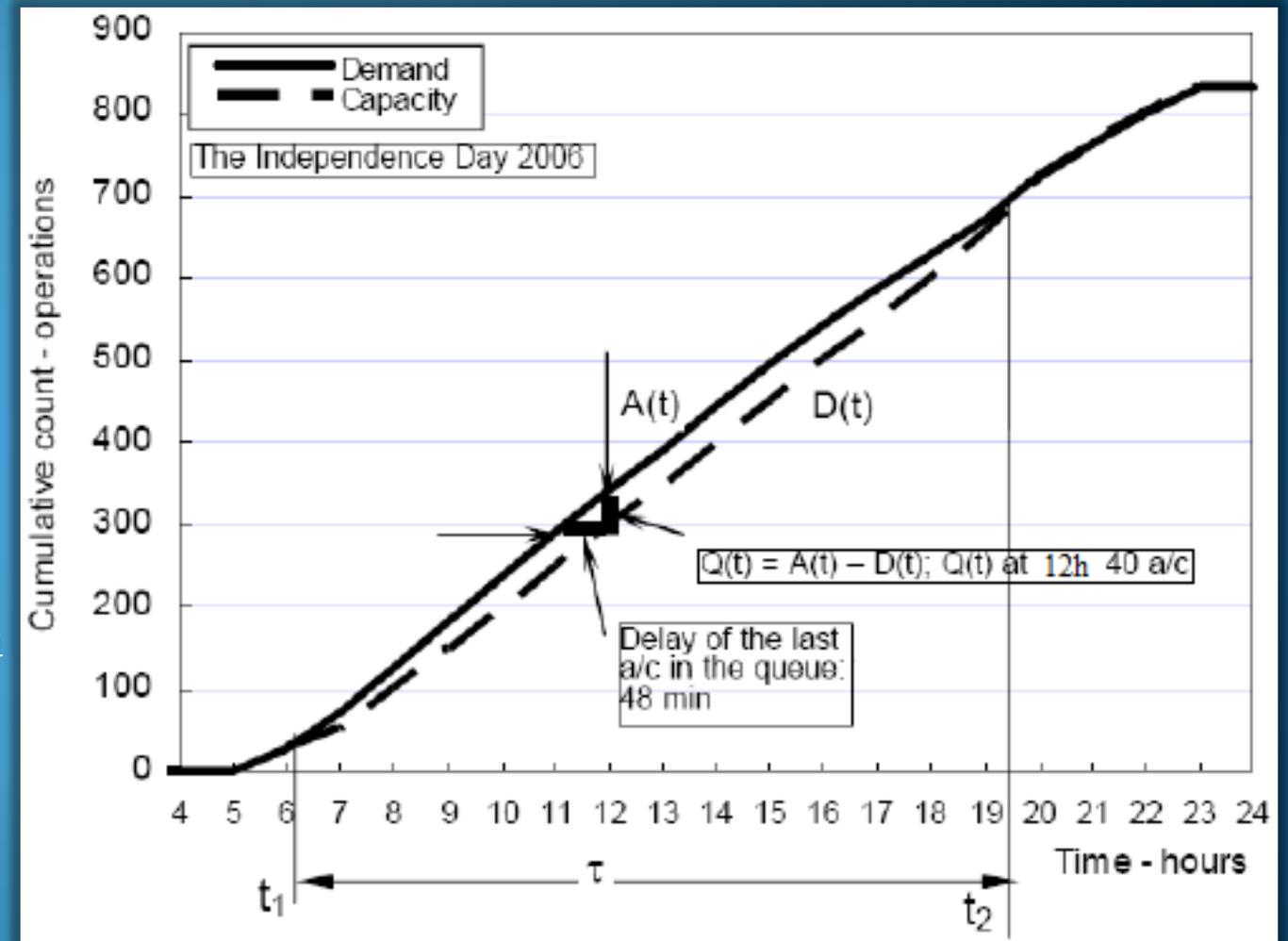
Capacidad práctica para una demora de 5 minutos.



Demoras

ENFOQUE DE LA TEORIA DE COLAS

- Modelo con $\rho > 1$ (Modelo determinista).
 - $\mu(t) = 50$ Op/h (zona lineal).
 - $A(t)$: Tasa acumulada de la demanda.
 - $D(t)$: Tasa acumulada de Servicio ($\mu(t) \times t$).
 - $Q(t)$: Cantidad de aeronaves en Cola.
 - $W(t)$: Demora de la ultima aeronave en la cola.
 $W(t) = Q(t)/\mu(t)$.



The cumulative count of demand, capacity, and the resulting congestion and delays when $\rho = D/C \geq 1$ at the NY LGA airport (US).

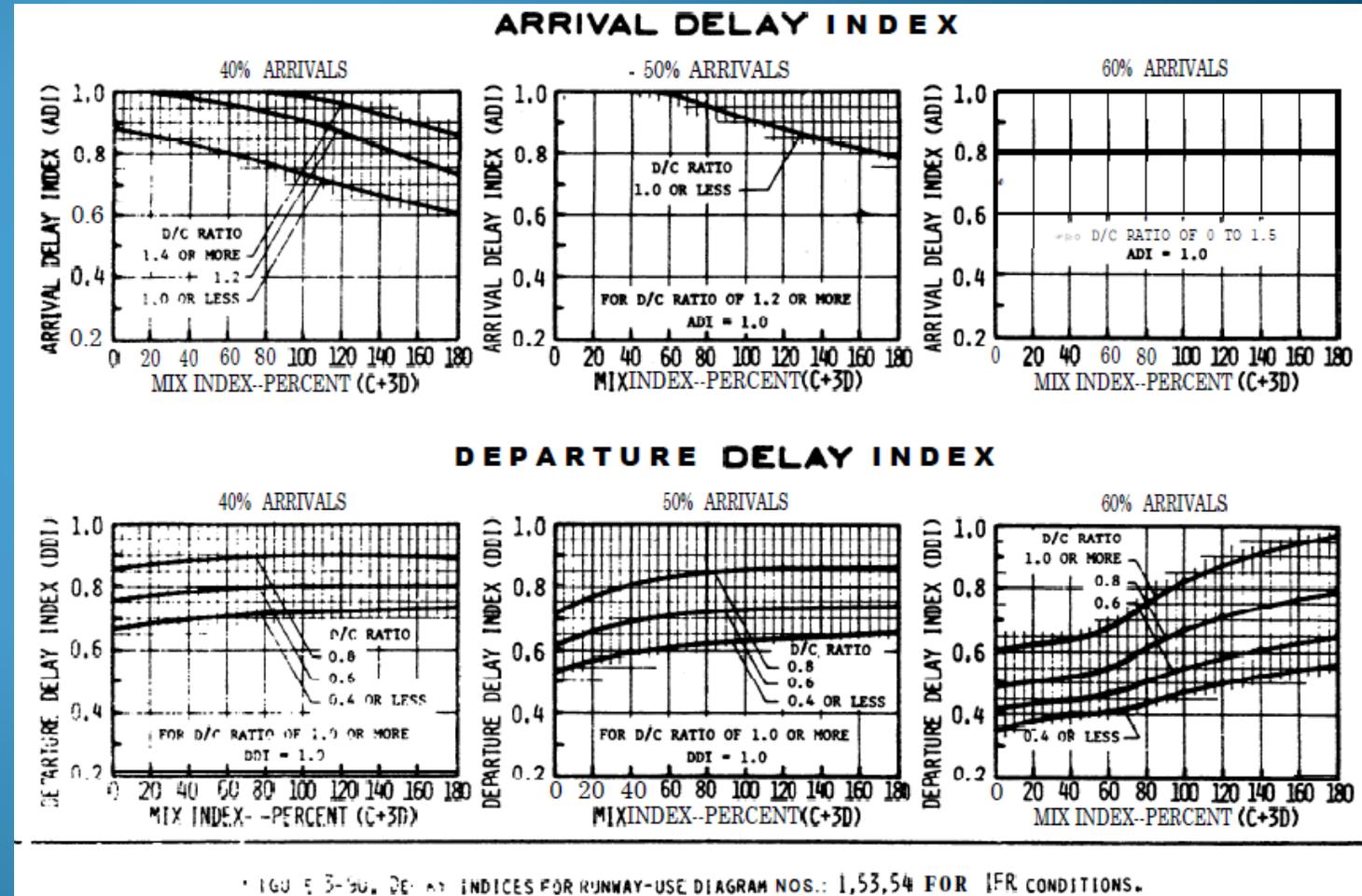
Demoras

FAA AC 150/5060-5, "Airport Capacity and Delay".

Para utilizarlo se debe conocer

- Mix.
- % de Arribos.
- λ : Tasa de arribos [Op/h].
- μ : Tasa de Servicio (Capacidad de Saturación) [Op/h].
- D/C: Ratio: λ/μ .
- DPO: Tasa de arribos pico durante 15 minutos (Dato estadístico).

De las tablas se obtiene el ADI o el DDI.

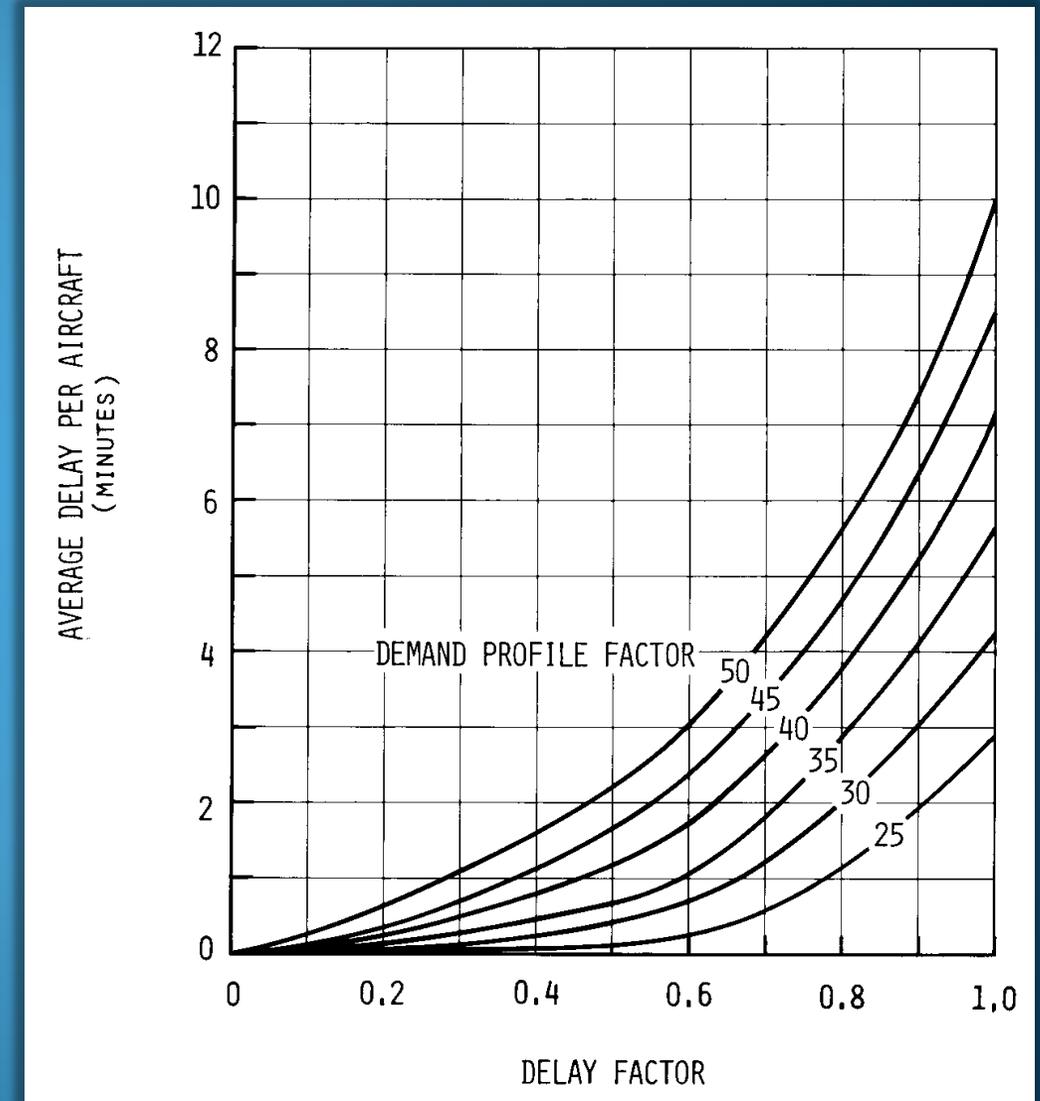


Demoras

FAA AC 150/5060-5, "Airport Capacity and Delay".

- Con el ADI y el DDI se obtienen los ADF y DDF:
 $DDF = DDI * (D/C)$
 $ADF = ADI * (D/C)$
- Luego se debe obtener el DPF:
 $DPF = DPO / \lambda$ [%].

Ingresar a la tabla con el DDF o ADF (DELAY FACTOR) y el DPF para obtener la demora promedio por aeronave para despegues y arribos respectivamente.



Demanda

Es la cantidad total de un bien o servicio que el público desea adquirir. En el caso de los Aeropuertos, es la cantidad de aeronaves/líneas aéreas/Pasajeros dispuestos a adquirir los servicios aeroportuarios.

El gran desafío de los Aeropuertos es poseer una infraestructura acorde a la demanda a atender, por lo que un **análisis de la Demanda y la capacidad** son cruciales en la etapa de desarrollo y ampliación de un Aeropuerto.

Para abordar estos estudios, los principales aeropuertos del mundo elaboran un documento denominado **Plan Maestro**. Estos tienen como fin de orientar los programas futuros de desarrollo de infraestructura e instalaciones de una manera lógica, sostenible y rentable.

Proporcionará una indicación de cómo se puede llevar a cabo la mejora de la capacidad en los plazos cortos (0-5 años) y mediano (6-10 años).





Capacidad, Demora y Demanda.

Cátedra : Aeropuertos, Aeronavegación e Impacto Ambiental (A3I) FRH-UTN.

Heathrow Expansion - The Preferred Masterplan



Capacidad, Demora y Demanda.

Cátedra : Aeropuertos, Aeronavegación e Impacto Ambiental (A3I) FRH-UTN.

Expansion Aeropuerto SAEZ 2019.



Demanda

A la hora de analizar la demanda, es necesario analizar su pasado, presente y futuro a fin de identificar tendencias y realizar pronósticos certeros. Para ello es preciso seguir un camino ordenado y con herramientas de predicción adecuadas a las condiciones de contorno.

Análisis Histórico y estimación del volumen futuro

- Operaciones (ACFT).
- Pasajeros.
- Envíos y Cargas.

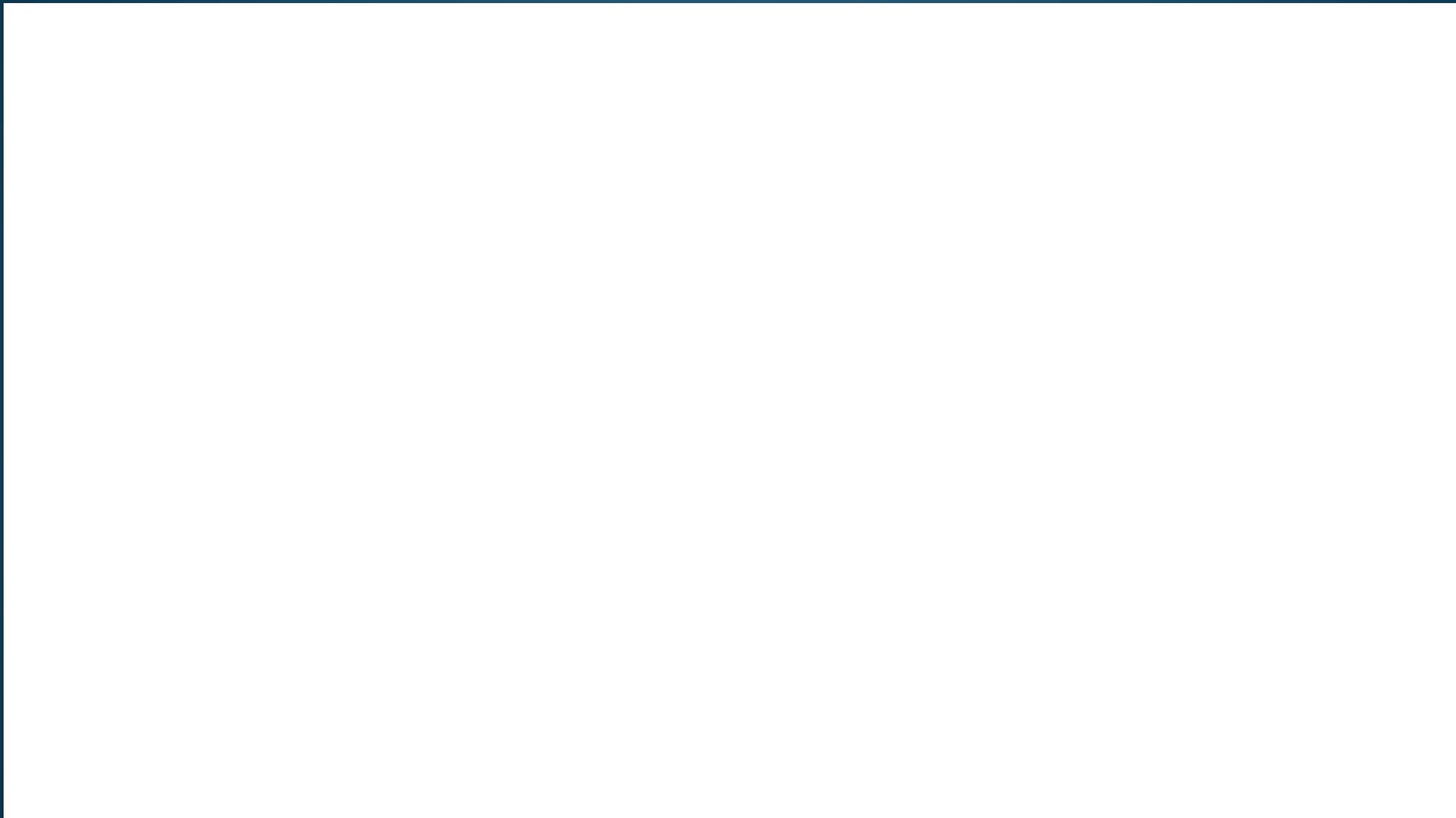
Información y datos requeridos

- Región donde se emplaza el AD.
- Datos de Población de la zona.
- Características económicas del área (PBI/GDP-Población- economía- Turismo).
- Mercado aéreo.
- Tendencias en actividad del transporte.
- Características económicas de las áreas circundantes.

Métodos de Análisis y Pronósticos

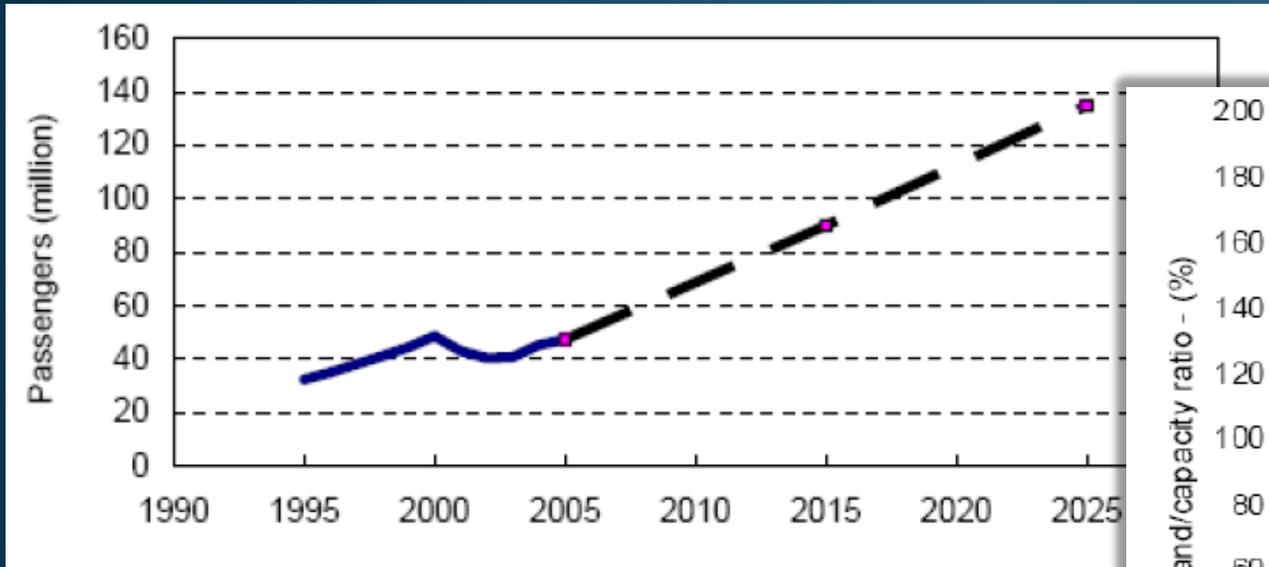
- Tendencias en el tiempo.
- Modelos económicos y escenarios posibles.
- Análisis de mercados.
- Volumen de pasajeros y operaciones (Meses y horas pico).
- Características de performance y operación.

Demanda

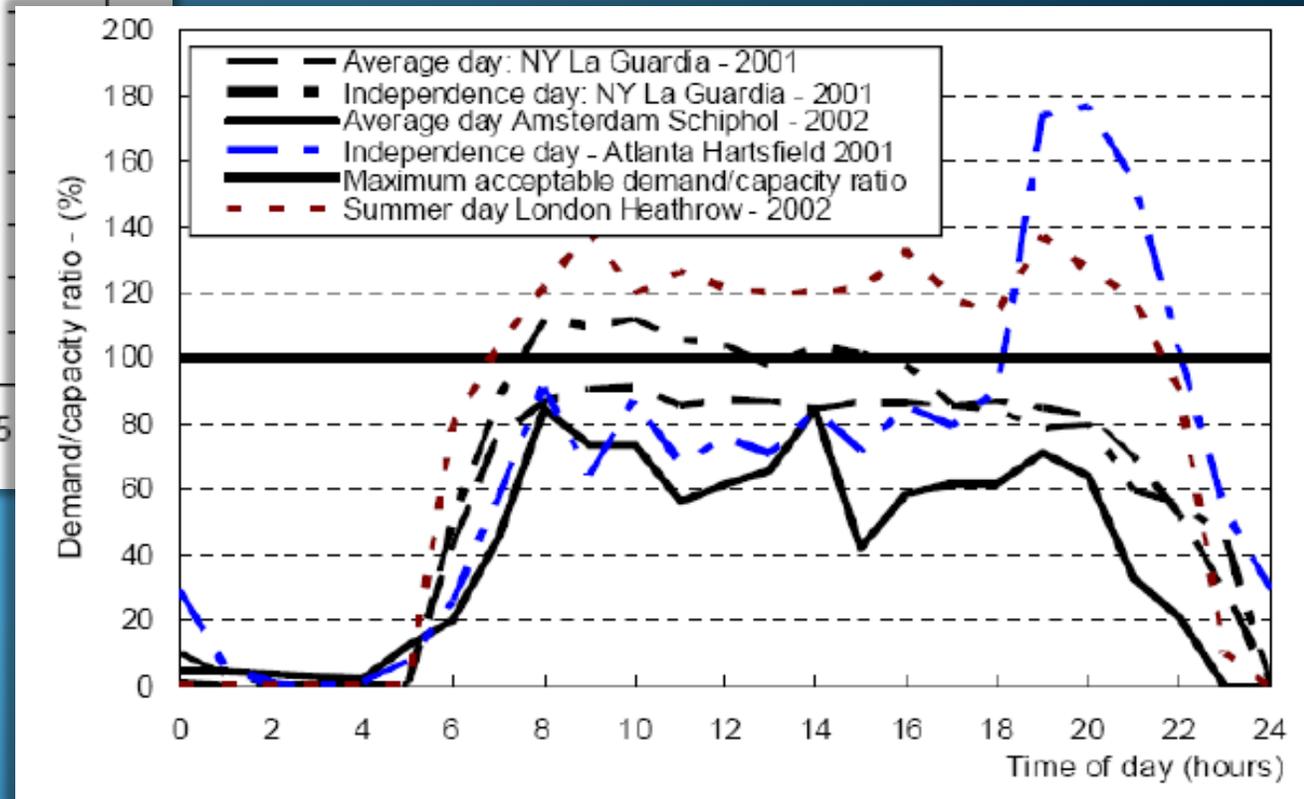


Demanda

Ejemplos de datos a utilizar.

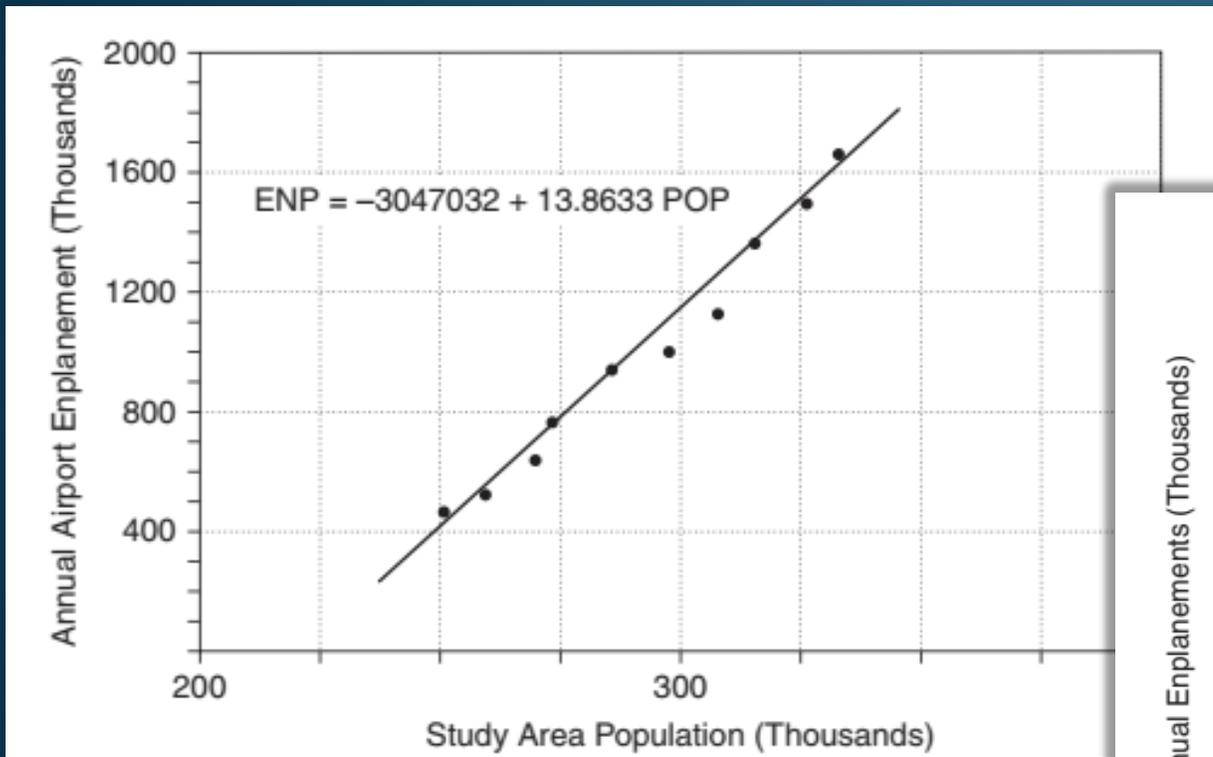


The EU-US passenger traffic in terms of the annual number of passengers.

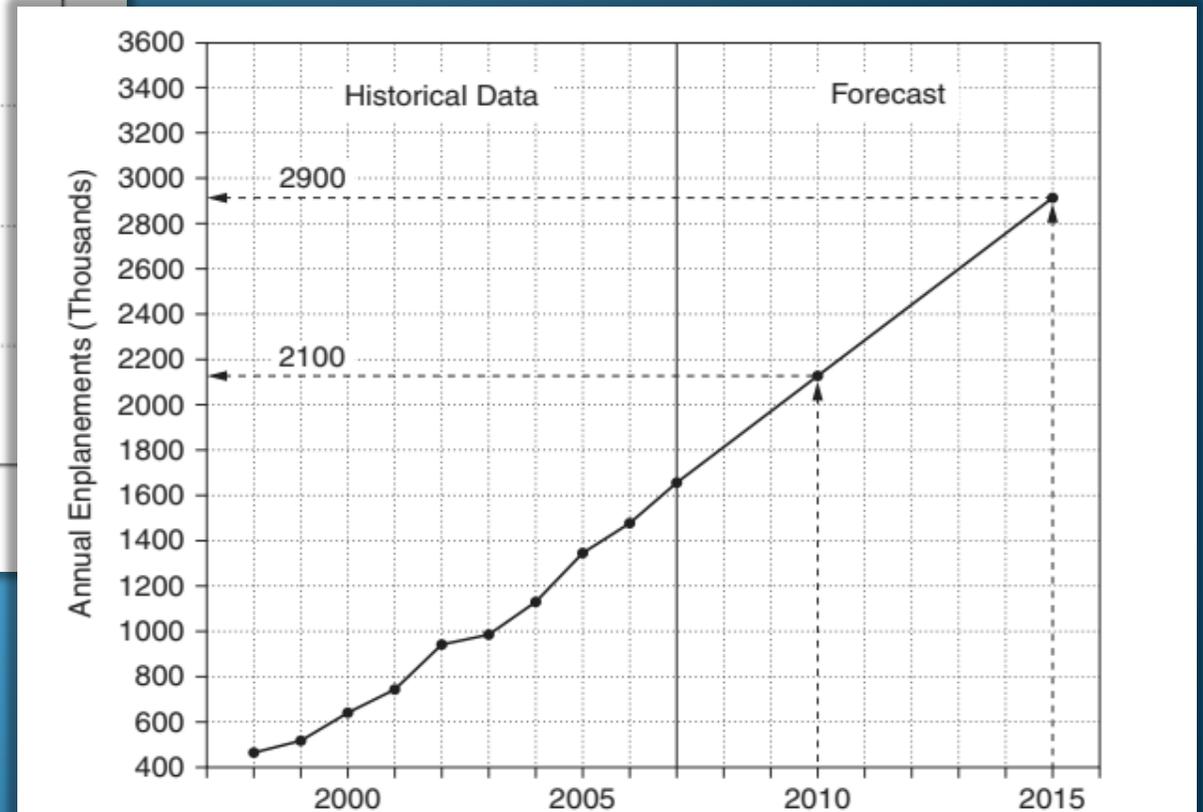


The daily variations of the demand/capacity ratio in the given examples.

Estimaciones de la demanda:



Embarques anuales en aeropuertos Vs población.



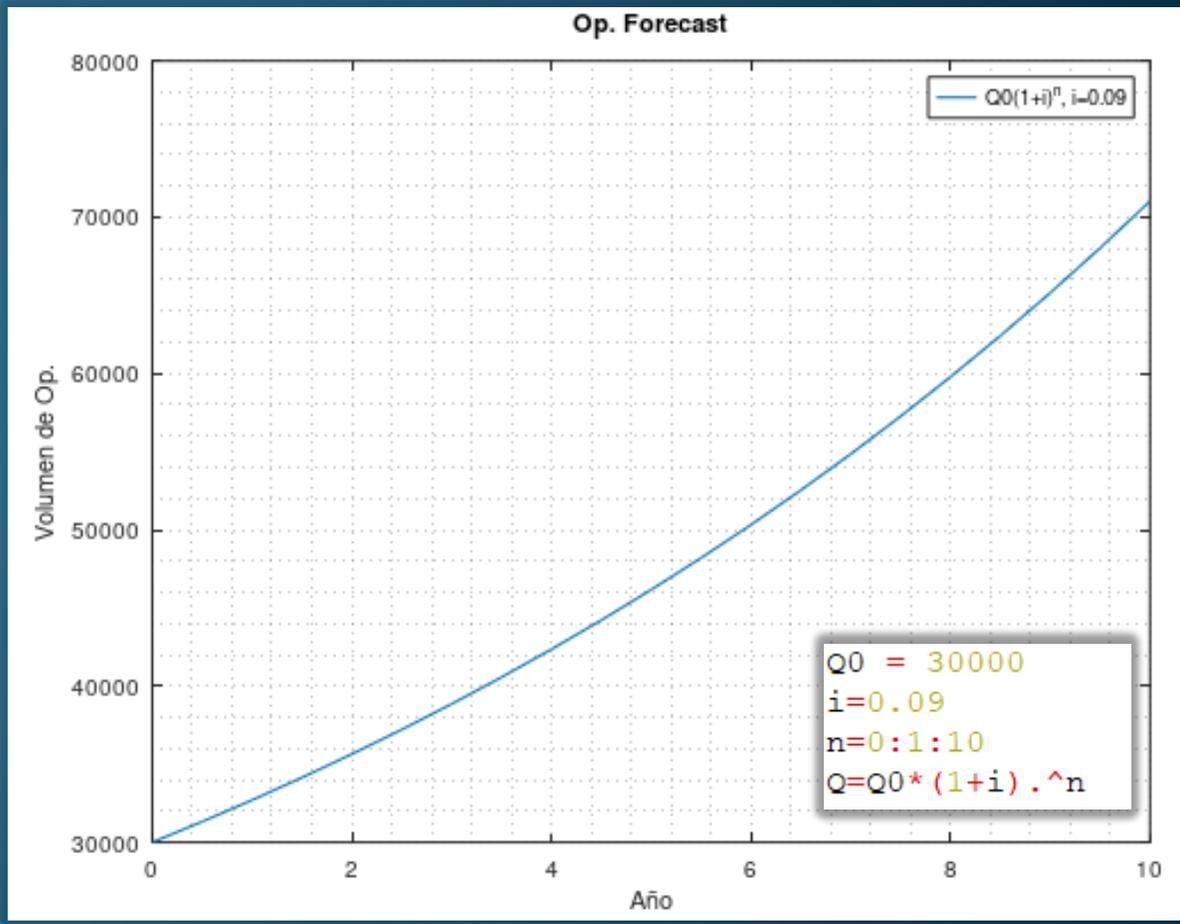
Embarques anuales en aeropuertos por año.

Demanda

Estimaciones de la demanda:

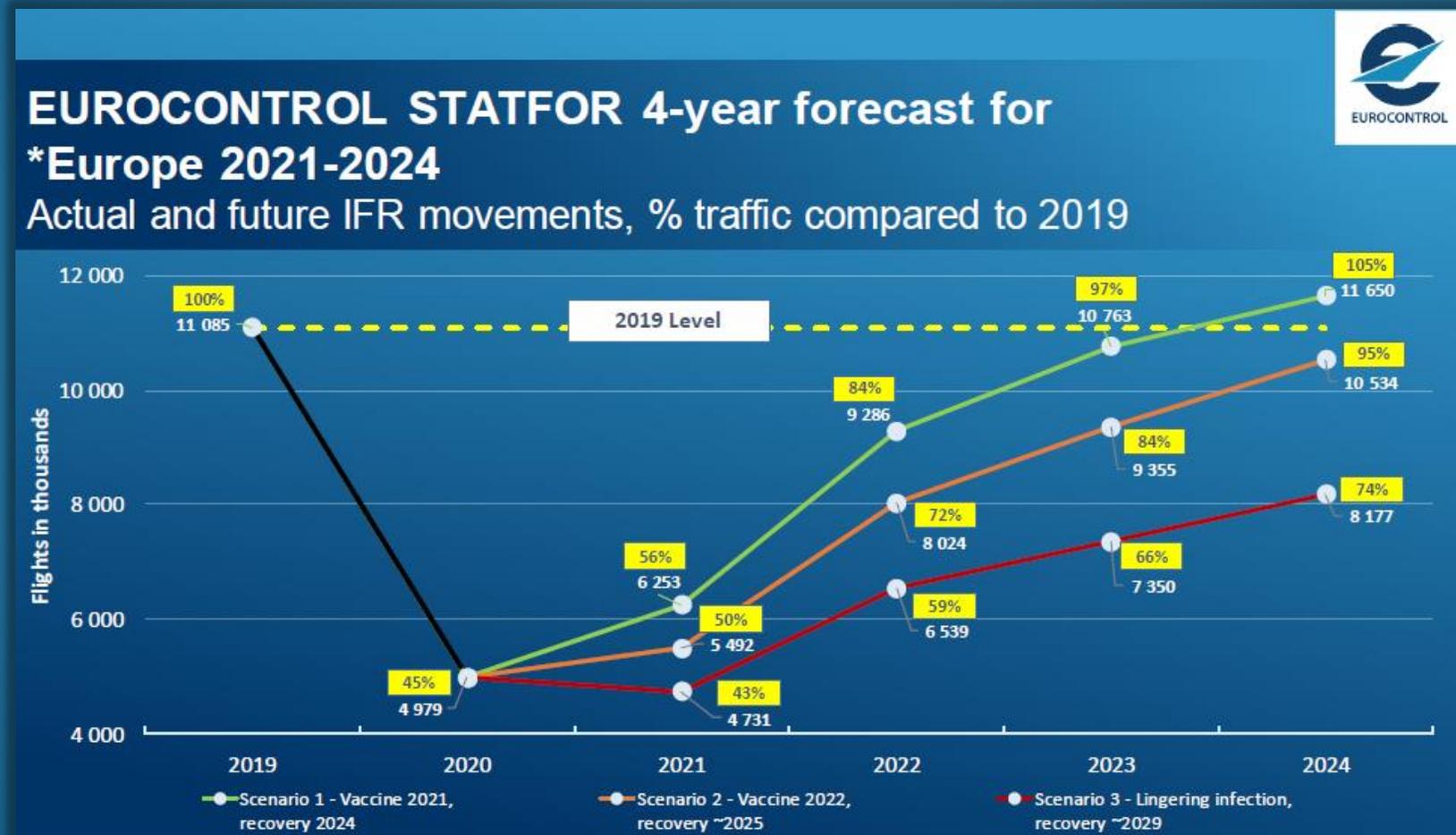
- Q_0 : is the volume of airport traffic in the base period (o) (atm; passengers; tons of freight shipments);
- Q_n : is the volume of airport traffic in the sub-period (n) counted from the starting (base) sub-period (o) (atm; passengers; tons of freight shipments);
- i : is the constant growth rate of the airport traffic in each sub period of a given time horizon;
- i_k : is the constant rate of the k-th factor, which may affect growth of a given airport traffic;
- k : is the number of factors that may affect the traffic at a given airport;
- n : is the number of sub-periods of a given time horizon (years).

$$Q_n = Q_0 (1+i)^n \prod_{k=1}^k (1-i_k)^n$$



Demanda

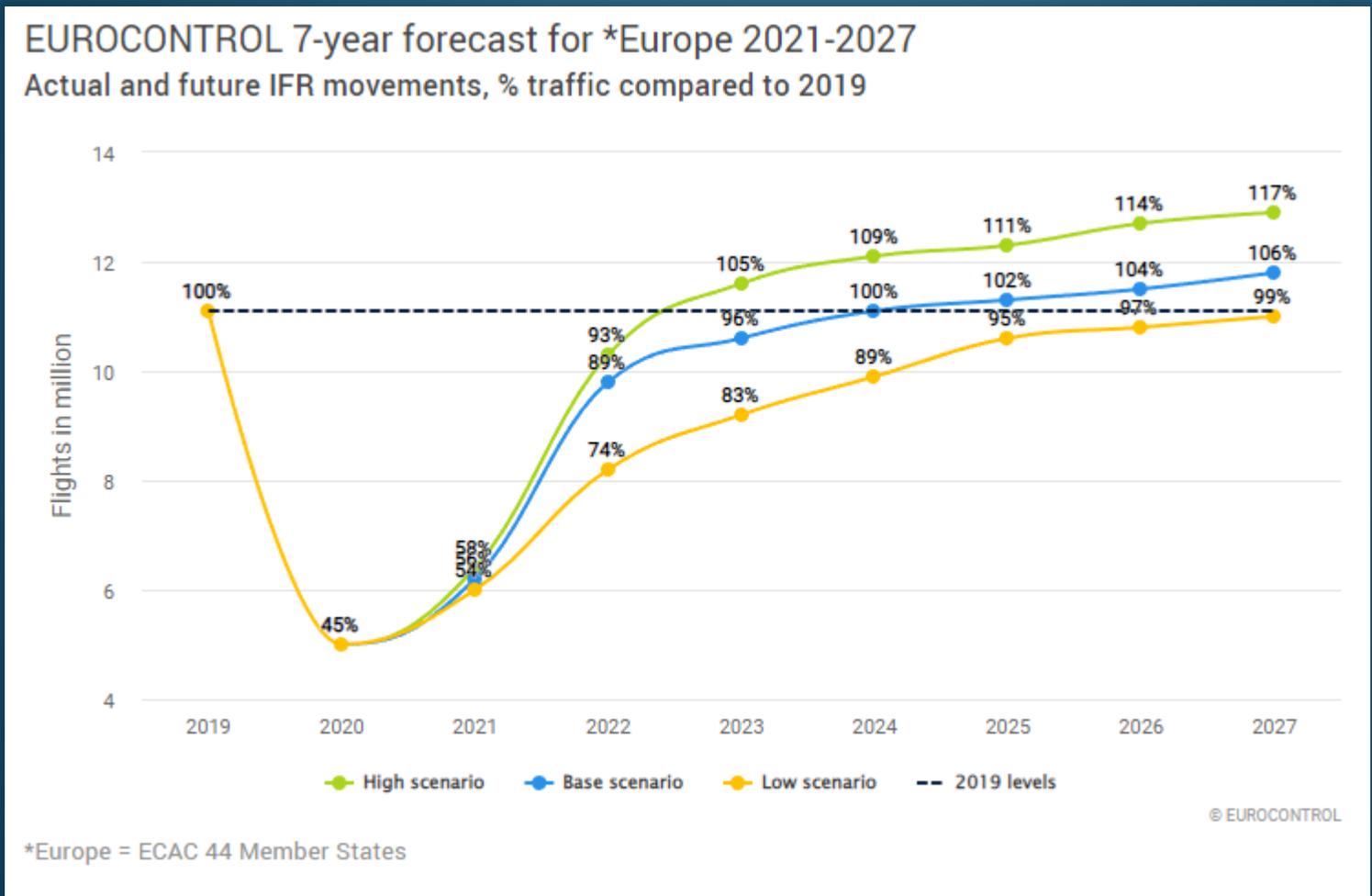
Estimaciones de la Demanda en escenario COVID (Eurocontrol):



EUROCONTROL Forecast Update 2021-2024, European Flight Movements and Service Units Three Scenarios for Recovery from COVID-19 STATFOR - May 2021.

Demanda

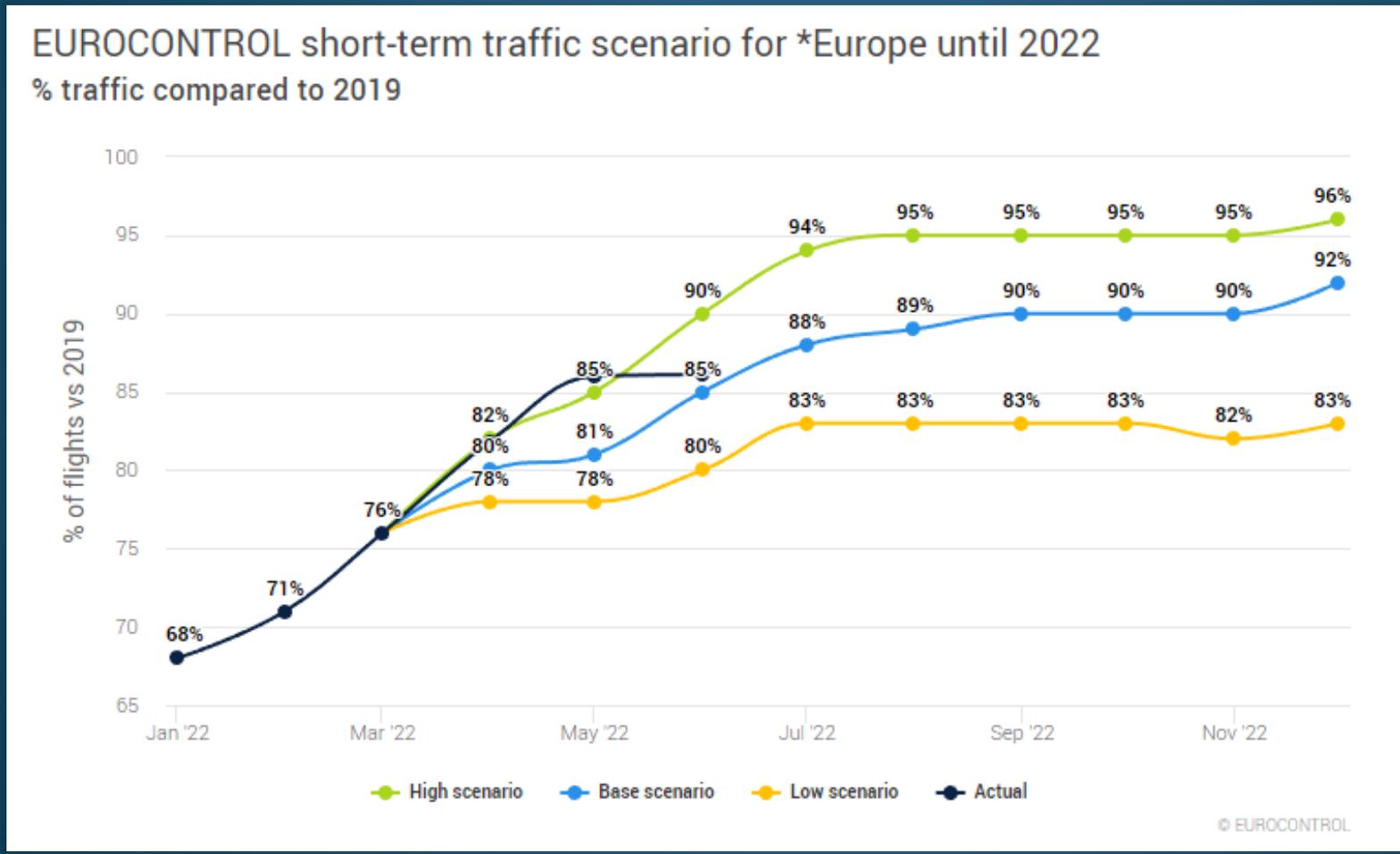
Escenario actual frente al pronosticado en May 2021 por EUROCONTROL



EUROCONTROL Forecast Update 2021-2027 European Flight Movements and Service Units - Three scenarios for recovery from COVID-19 - Oct 2021.

Demanda

Escenario 2022 frente al pronosticado en May 2021 por EUROCONTROL



Referencias

Planning and design fo Airport, FIFTH Edition (2010) – Horonjeff, McKelvey, Sproule, Young.

- Cap. 5 - Forecasting for Airpor Planning.
- **Cap. 12 - Airport Airside Capacity and Delay.**
(Ver ejercicios de los temas desarrollados)

