

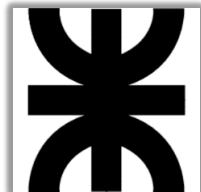
# Cálculo de capacidad de pista, modelo simplificado mediante simulación de Monte Carlo

Ing. Aero. Alejandro M. Miguel<sup>(1)</sup> : alemiguel93@gmail.com

Ing. Aero. Eduardo Carceglia<sup>(1)</sup>.

Ing. Aero Carlos Varrenti<sup>(1)</sup>.

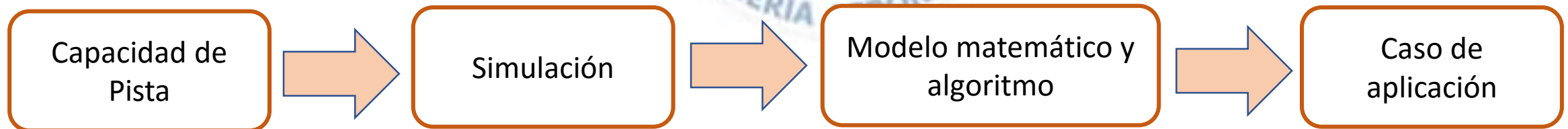
*(1) Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Haedo, Haedo, Buenos Aires, Argentina.*



## Cálculo de capacidad de pista, modelo simplificado mediante simulación de Monte Carlo

El objetivo del siguiente trabajo es presentar modelo de simulación simplificado y extrapolable a cualquier herramienta informática capaz de procesar cálculos numéricos, útil para la estimación de la capacidad de pista de un aeropuerto mediante la aplicación del método de Monte Carlo.

Temáticas a desarrollar:



## Capacidad de Pista

*La capacidad de pista o sistema de pistas, refiere al máximo número de operaciones aéreas (despegues-aterrizajes) que pueden realizarse en un sistema de pistas, durante un lapso de tiempo determinado, bajo condiciones específica de operación (techo de nubes-visibilidad-ATC-aeronaves-tipo de operación). Normalmente se refiere a la capacidad como operaciones hora [Op/h].*

### Capacidad última o de Saturación:

*Tasa máxima de operaciones que un aeropuerto puede gestionar bajo condiciones de demanda continua, sin considerar la demora ocasionada.*



## Simulación y capacidad de pista

La simulación 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. Como aplicación al cálculo de capacidad de pista, los modelos por simulación generalmente son modelos de tiempo rápido que emulan el movimiento de las aeronaves, los cuales son utilizados para analizar y cuantificar la capacidad del aeródromo.

Una de las técnicas de simulación utilizadas y a desarrollar, es el método de Monte Carlo, el cual tiene por objetivo reproducir los valores de una variable, basados en los parámetros estadísticos que las definen y en la selección de números aleatorios, introducidos como entrada.

Es requisito conocer:

- información empírica o histórica de las variables a estudiar.
- Tipo de distribución de probabilidad apropiada de los datos a ingresar.

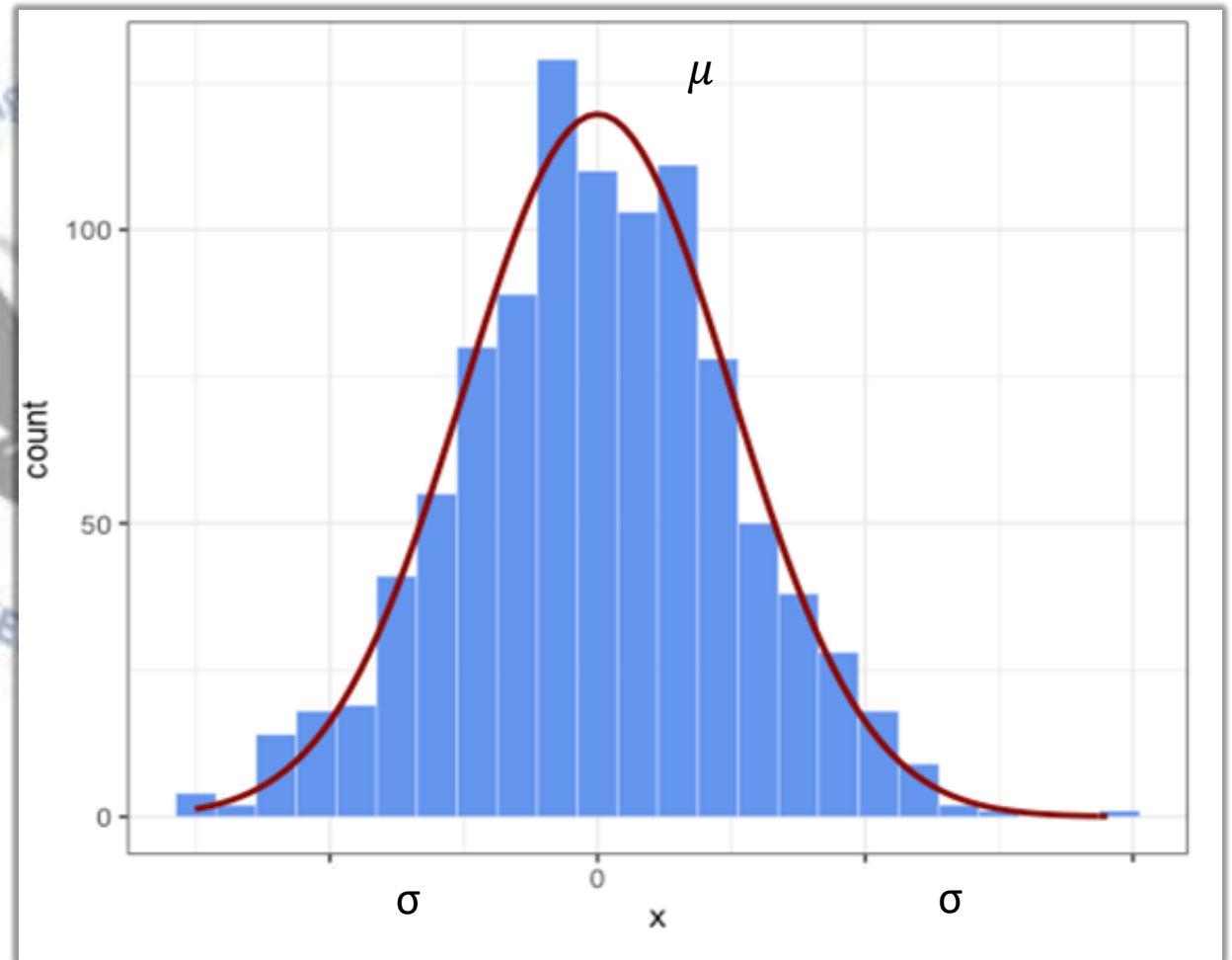
Una vez generados los valores de las variables de interés, es posible introducir los mismos en una ecuación característica definida, obteniendo como resultado de las simulaciones eventos probabilísticos, los cuales exponen no sólo lo que puede suceder, sino la probabilidad de que un evento suceda.

## Simulación: método de Monte Carlo

El método de Monte Carlo caracteriza un sistema mediante variables derivadas a partir de una distribución estocástica. Para ello se requiere conocer parámetros de las variables a analizar, obteniendo así una media  $\mu$ , y un desvío de la misma  $\sigma$ , y un valor aleatorio tomado por el ordenador ( $n$ ).

Como resultados de estas simulaciones, obtendremos histogramas de datos normalmente distribuidos que nos indicaran los posibles comportamientos de las variables.

$$X = f(\mu_x, \sigma_x, n)$$

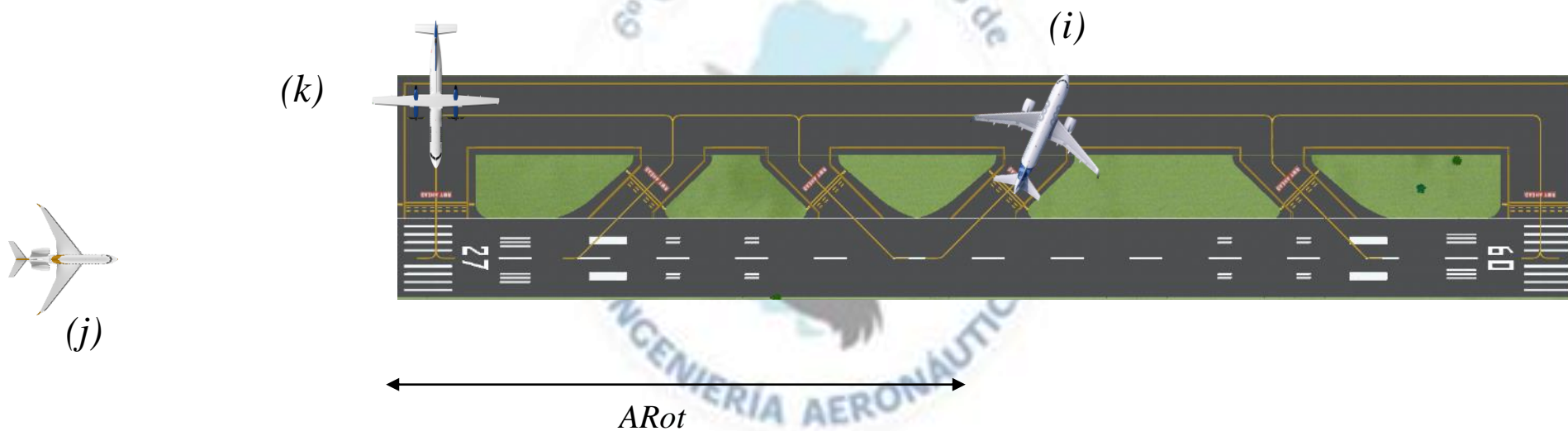


## Modelo matemático



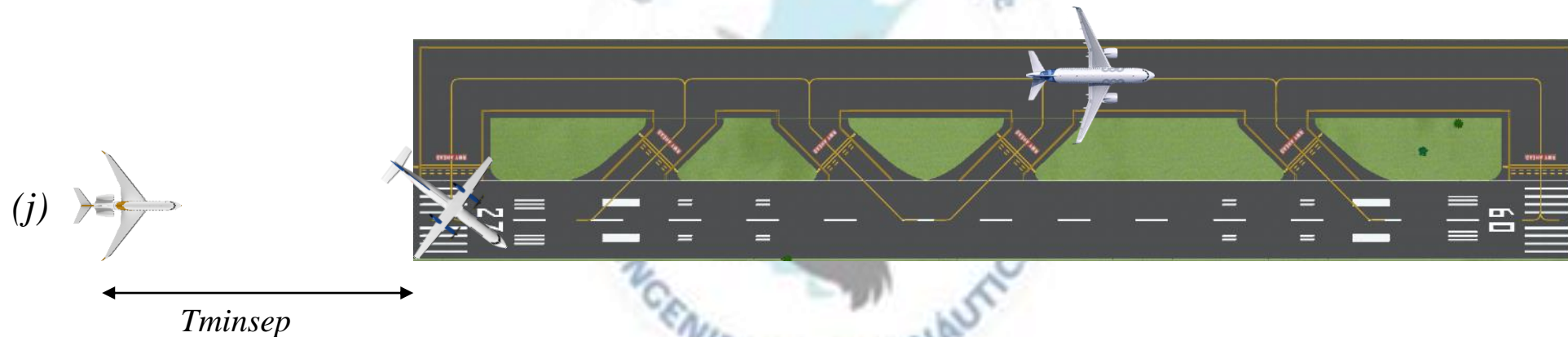
Teniendo en cuenta las reglas de secuenciación consideraremos la figura 1, donde encontramos dos aeronaves (*i* e *j* respectivamente) aproximando a la pista y una aeronave *k*, en el punto de espera, próxima a despegar.

## Modelo matemático



La aeronave  $i$  arribará en un tiempo  $t = T_i$ , despejando la pista luego de un tiempo determinado que denominaremos ( $ARot$ ).

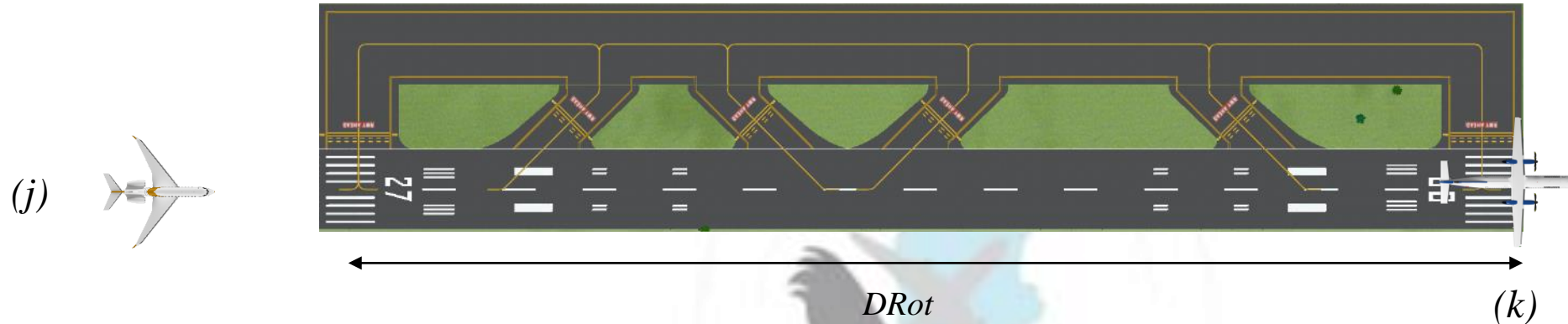
## Modelo matemático



Una vez que la aeronave  $i$  despeja la pista, la aeronave  $k$  podrá ingresar a la pista y despegar, sólo si la aeronave  $j$  se encuentra una distancia mayor o igual a la de seguridad representada por el tiempo ( $T_{minsep}$ ).



## Modelo matemático

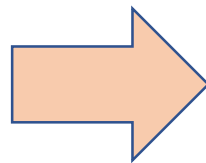


Asumiendo que la aeronave  $k$  despegue de manera segura, esta iniciará la carrera de despegue bloqueando la pista un tiempo  $DRot$ , durante el cual ninguna otra aeronave deberá ocupar la misma. Posterior al despegue la aeronave  $j$  aterrizará en un tiempo  $Tj$ .

Del modelo propuesto, podemos deducir las siguientes ecuaciones a cumplirse, donde para que una aeronave despegue entre dos arribos, se deberá cumplir un tiempo mínimo:

➤  $Tj - Ti > ARot_i + Tminsep$

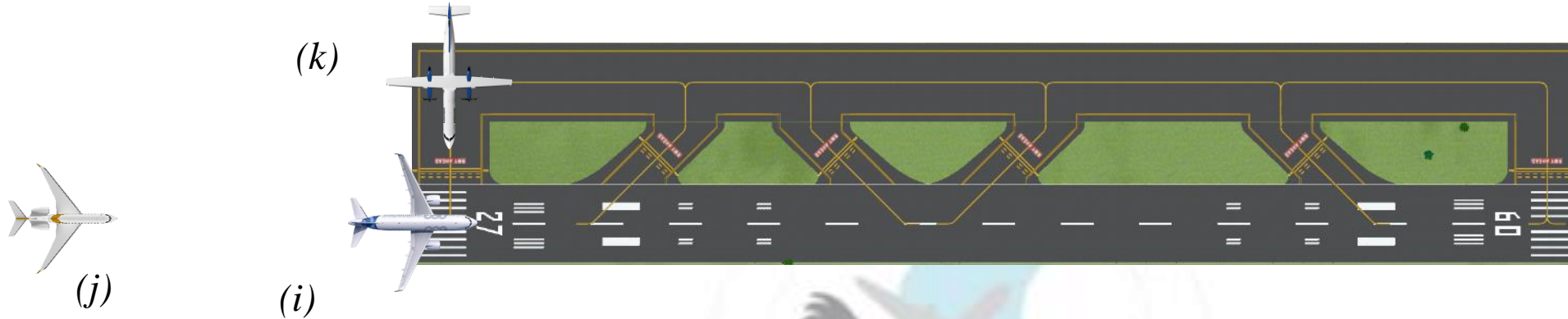
➤  $DRot < Tminsep$



➤  $Tij > ARot_i + Tminsep$

➤  $DRot < Tminsep$

## Modelo matemático



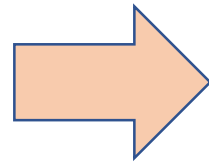
Del modelo propuesto, podemos deducir las siguientes ecuaciones a cumplirse, donde para que una aeronave despegue entre dos arribos, se deberá cumplir un tiempo mínimo:

➤  $T_{ij} > ARot_i + T_{minsep}$

➤  $T_{ij} > ARot_i + T_{minsep} + (n - 1) * Td + \varepsilon(t)$

➤  $DRot < T_{minsep}$

➤  $DRot < T_{minsep} + \varepsilon(t)$



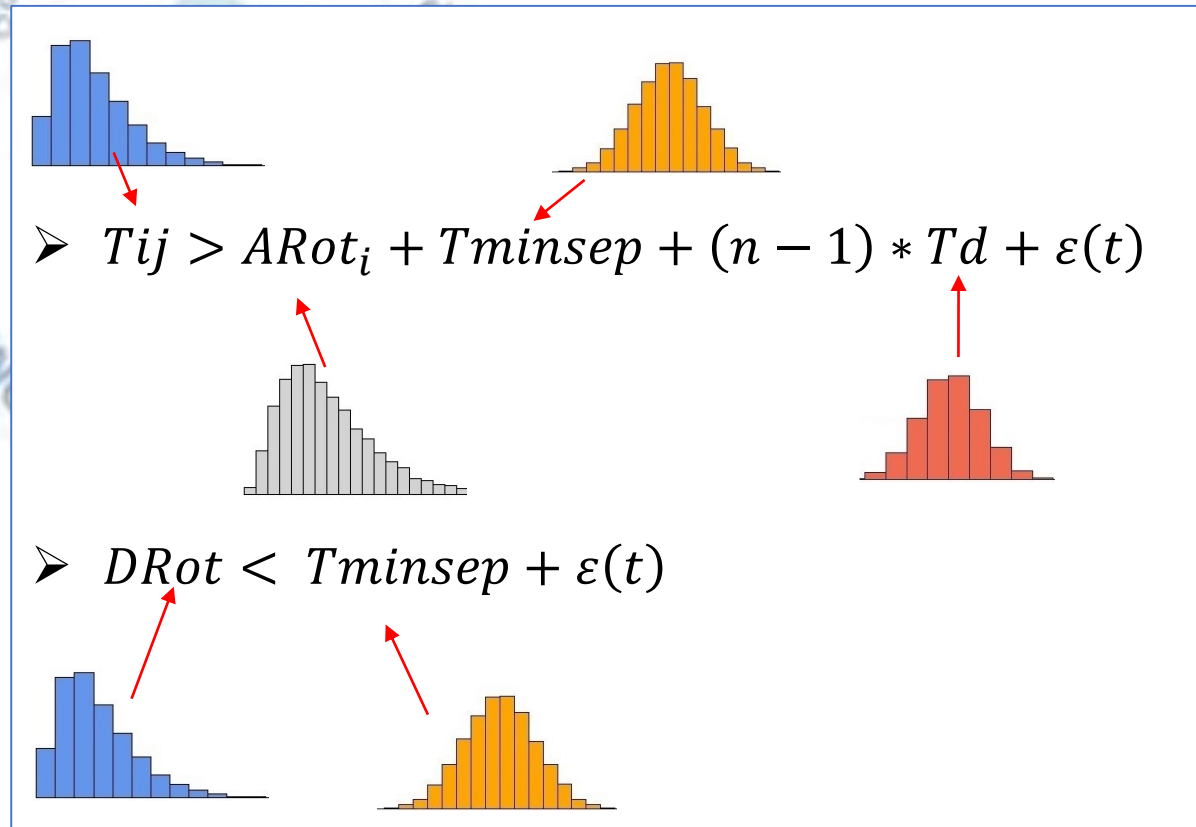
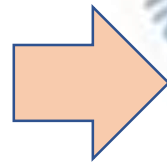
En caso de que se efectúe más de un despegue entre arribos, se deberá considerar el termino  $(n - 1) * Td$  donde  $Td$  es el tiempo de separación entre despegues sucesivos y  $n$  la cantidad de despegues efectuados. Adicionalmente puede agregarse un tiempo de seguridad  $\varepsilon(t)$ .

## Algoritmo de simulación

Considerando la ecuación característica formulada anteriormente y las variables requeridas, se conformara el algoritmo de la simulación, cuyo objetivo será resolver la ecuación característica a fin de encontrar la cantidad operaciones (despegues y aterrizajes) a efectuarse durante una hora.

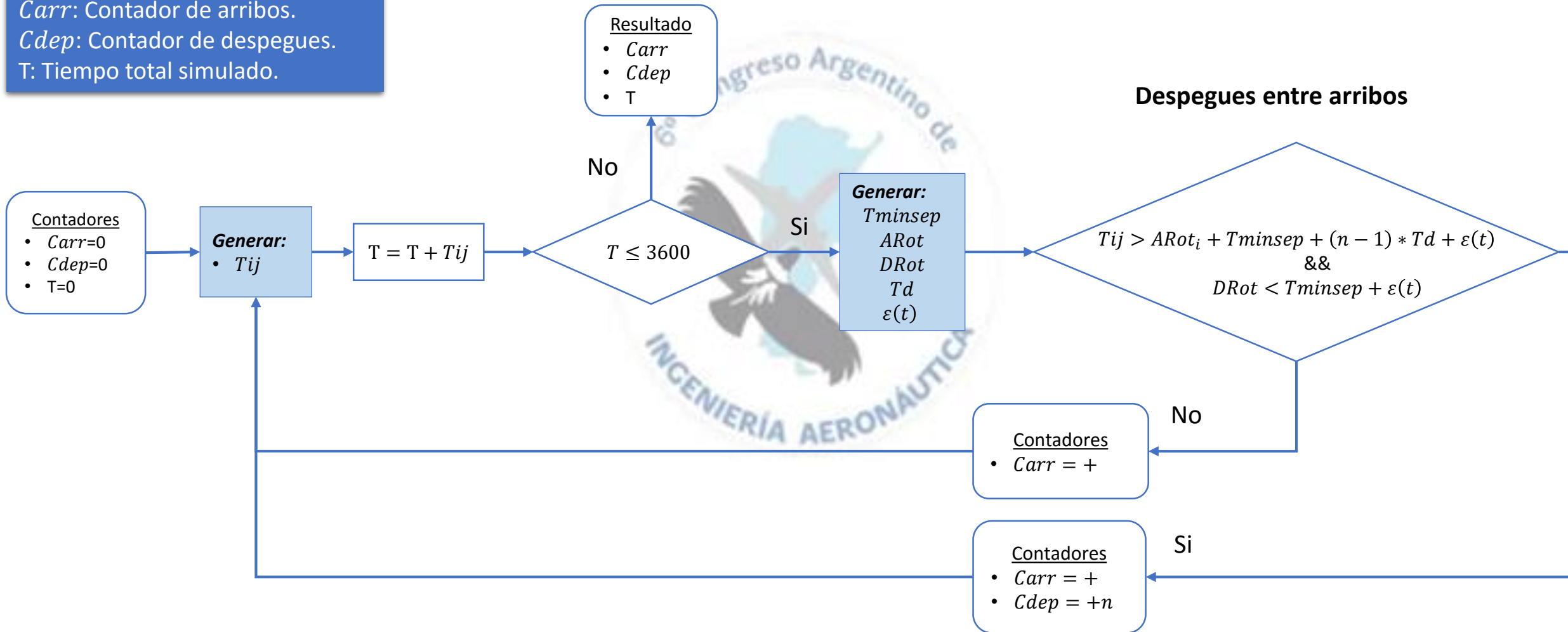
Por lo que deberemos resolver la ecuación característica para un tiempo "T" menor o igual a 3600s, donde gráficamente se buscará resolver:

- $T = \sum_1^m T_{ijm} \leq 3600s.$
- $T_{ij} = f(\mu_{T_{ij}}, \sigma_{T_{ij}}, n).$
- $T_{minsep} = f(\mu_{T_{minsep}}, \sigma_{T_{minsep}}, n).$
- $ARot = f(\mu_{ARot}, \sigma_{ARot}, n).$
- $DRot = f(\mu_{DRot}, \sigma_{DRot}, n).$
- $Td = (\mu_{Td}, \sigma_{Td}, n).$



# Algoritmo de simulación

*Carr*: Contador de arribos.  
*Cdep*: Contador de despegues.  
*T*: Tiempo total simulado.



## Caso de Aplicación

Como caso de aplicación del modelo, se presenta un aeropuerto hipotético, el cual cuenta con los siguientes datos obtenidos de estudios estadísticos.



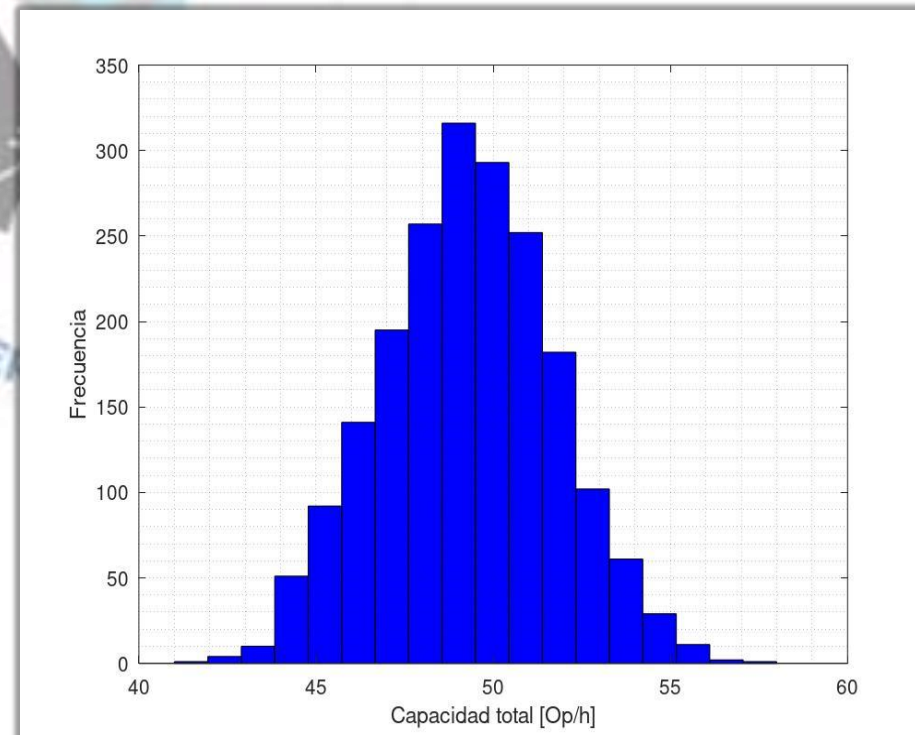
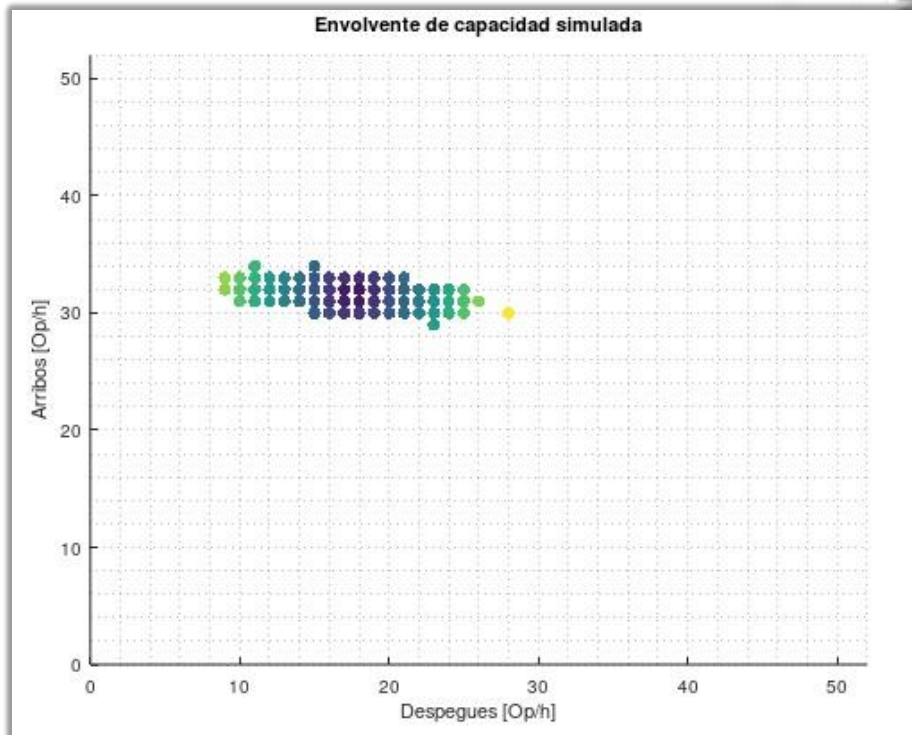
Estadística recopilada

- $\mu_{Tij} = 112 \text{ s}$
- $\sigma_{Tij} = 11.9 \text{ s}$
- $\mu_{Tminsep} = 53.19 \text{ s}$
- $\sigma_{Tminsep} = 10 \text{ s}$
- $\mu_{ARot} = 45.9 \text{ s}$
- $\sigma_{ARot} = 5.5 \text{ s}$
- $\mu_{DRot} = 42.55 \text{ s}$
- $\sigma_{DRot} = 5 \text{ s}$
- $\mu_{Td} = 75.6 \text{ s}$
- $\sigma_{Td} = 29.84 \text{ s}$
- $\varepsilon(t) = 9.90 \text{ s}$

Datos a ingresar

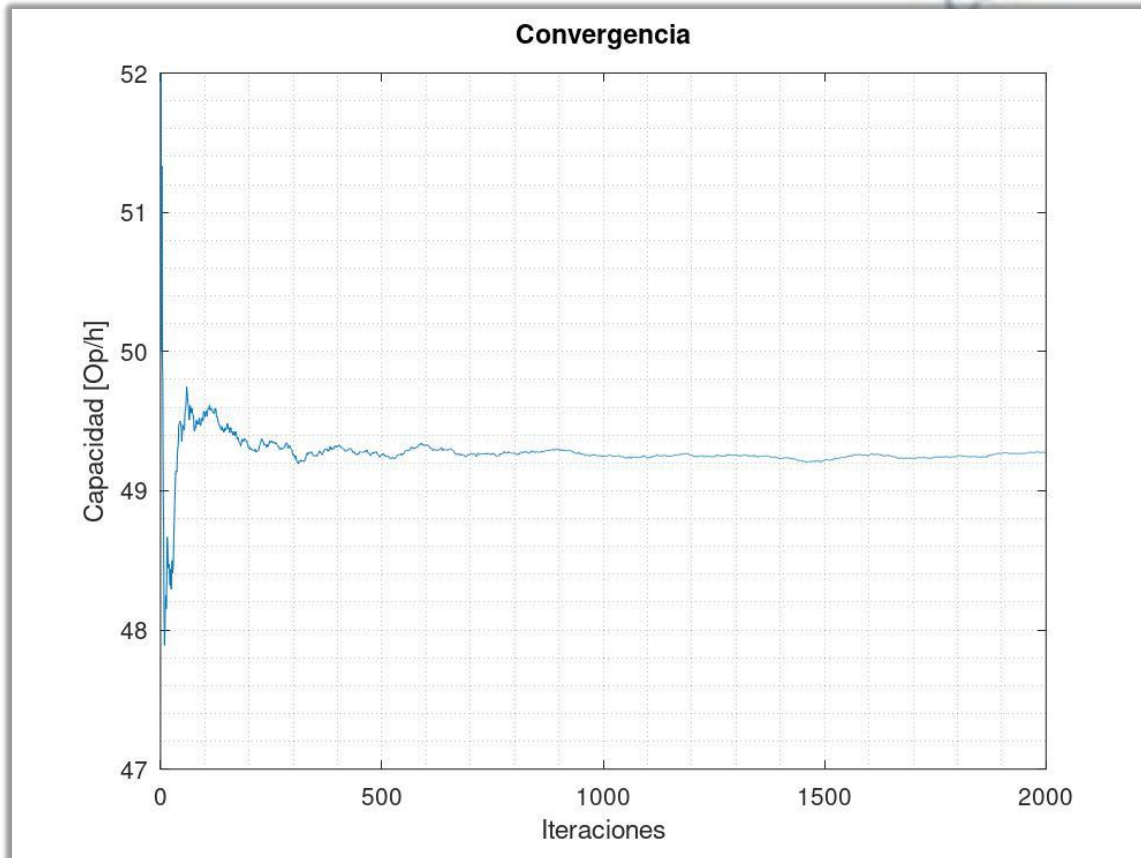
## Caso de Aplicación

Los datos servirán como parámetros de entrada a la simulación, donde inicialmente realizaremos 2000 iteraciones, lo que equivale a simular un aeródromo operando bajo una demanda ininterrumpida durante 2000 horas. Como resultado de la simulación obtenemos la figura donde se observa la envolvente de capacidades horarias esperadas para los tiempos calculados y la figura un histograma de frecuencias de las capacidades horarias estimadas.



## Caso de Aplicación

A fin de determinar qué tan representativos son los resultados obtenidos del comportamiento de las variables, la siguiente figura expone la evolución de la capacidad horaria media, donde se evidencia una convergencia al incrementar el número de horas simuladas.



Iteraciones	Resultado
10	48,10
50	49,46
100	49,53
200	49,30
500	49,25
1000	49,24
1500	49,22
2000	49,27

## Conclusiones



La simulación es una herramienta que permite construir un modelo lógico-matemático de un sistema, a fin de experimentar y analizar su comportamiento, brindando una mayor sofisticación al cálculo de la capacidad de pista. Como resultado, se obtiene una envolvente de capacidades horarias y sus respectivas frecuencias, exponiendo el desempeño operativo del aeródromo analizado.

Partiendo de información empírica y/o estadística de las variables involucradas, la simulación produce una distribución de valores de los resultados posibles. El grado de sofisticación del modelo dependerá esencialmente del número de entradas de información y detalles significativos involucrados en el sistema a modelar.

Esta metodología colabora con proporcionar una descripción de una de las áreas involucradas en la Gestión del Tránsito Aéreo (ATM), a fin de optimizar la capacidad disponible del aeropuerto y el espacio aéreo.



¡Gracias!

¿Preguntas?