

# Trabajo Práctico 1. Aplicaciones Computacionales en Negocios

Agosto 2025

El trabajo debe ser realizado por un grupo de hasta 4 personas. Pueden mezclarse alumnos de distintas secciones. Trabajos individuales no son aceptables salvo expresa autorización del profesor y por un motivo ineludible.

## Reglas del trabajo práctico

Los entregables son:

Una presentación de 15 slides con:

- presentación del problema y discusión de elecciones de modelado
- esquemas del código implementado
- los parámetros de la simulación e implementación
- resultados a las preguntas formuladas a través de gráficos y estadísticas
- cualquier otra idea / concepto / que se quiera investigar en este proyecto a través del modelo propuesto

Una presentación oral en grupo de 15 minutos. El código de las simulaciones, en Python, a entregar a los ayudantes del curso.

Nicolás indicará la fecha de presentación para cada grupo en la semana del 22 de septiembre. Dos integrantes del grupo, elegidos por Nicolás, presentarán el trabajo. Los otros dos deberán estar disponibles para correr y explicar el código cuando los

ayudantes lo soliciten.

### El problema

Queremos modelar y simular el comportamiento de aviones que arriban al Aeropuerto Jorge Newbery (AEP) de la ciudad de Buenos Aires, teniendo en cuenta su proceso de aproximación y aterrizaje bajo condiciones estocásticas de congestión y clima. Supondemos que el horario de operación es de 6am a medianoche. El trabajo busca analizar el desempeño del sistema ante diferentes niveles de demanda y condiciones climáticas, y proponer políticas que mejoren la operación del sistema.

### Preguntas exploratorias

(Googleá, lee papers, buscá data si fuera necesarios. Esto es parte importante de un proyecto aplicado)

**Cuántos aviones aterrizan en AEP entre las 6am y la medianoche?**    **Aprox entre 140 y 190**

Supongamos que el avión típico es un Boeing 737. A medida que un avión se aproxima a AEP reduce su distancia a la pista y reduce su velocidad (no vamos a distinguir entre velocidad respecto al aire que rodea al avión y respecto a la tierra, las suponemos iguales). En aviación la unidad de distancia es la milla náutica (mn) y la unidad de velocidad es el nudo (k). Supongamos que la aproximación a AEP comienza cuando el avión está a 100 millas náuticas de distancia.

Los parámetros de aproximación son los siguientes

Distancia a AEP	Rango de velocidad permitido
más de 100mn	500 - 300 nudos <b>Serían aprox 12 minutos</b>
100mn a 50mn	300 - 250 nudos
50mn a 15mn	250 - 200 nudos
15mn a 5mn	200 - 150 nudos
5mn a aterrizaje	150 - 120 nudos

**1 milla náutica (mn)  
= 1.852 km.  
1 nudo = 1.852km/h.**

**Cuánto es una milla náutica en kilómetros? Y un nudo en kilómetros por hora?**

Sanity check. **A partir de la data arriba, cuánto tardaría un avión en llegar desde las 100 mn hasta AEP? Y si la velocidad a más de 100 mn fuera 500 nudos, cuánto tardaría en llegar desde Rosario a AEP? Estos órdenes de magnitud tienen sentido con lo que podés consultar en Aerolíneas Argentinas?**

**25,89 ~26  
minutos**

Supongamos que no puede haber aterrizajes separados por menos de cuatro minutos entre sí. Esta distancia temporal existe por seguridad y para permitir despegues entre aterrizajes.

Cuál es la cantidad máxima de aterrizajes que podrían suceder en teoría en AEP por entre las 6am y la medianoche? **270 arribos**

### Simulación del proceso de operación entre 6am y medianoche

Supongamos que los aviones aparecen en el radar de AEP desde la dirección que implica una línea recta a la cabecera de pista (esto es, no tenemos aviones viniendo desde distintos puntos cardinales). Medimos el tiempo en minutos. Un avión aparece visible en el radar de AEP a 100 mn de distancia en cada minuto con probabilidad  $\lambda < 1$  y de manera independiente entre distintos minutos. Cuando el camino está despejado los aviones realizan su aproximación de acuerdo a la velocidad máxima posible en el rango de velocidad que corresponde a su distancia a AEP.

$$100/500 \times 60 = 0.2 \times 60 = 12 \text{ minutos}$$

Si tarda más de 12 minutos, va muy lento, por lo tanto  $< 100 \text{ mn} \Rightarrow$  aparece en el radar

¿Nos quedamos con el que tiene las probabilidades más altas?

Si dos aviones aparecen en el horizonte de 100mn con menos distancia temporal que 4 minutos, o se encuentran en la cola con distancia temporal de menos de 4 minutos, el 2do avión (que ve la velocidad del avión de adelante y puede ajustar la propia instantáneamente) baja su velocidad en 20 nudos vs la del avión de adelante durante el tiempo que sea necesario hasta lograr una distancia temporal de 5 minutos (uno más que el mínimo de 4 para tener un buffer). Logrado esto, revierte a la velocidad máxima posible para su distancia a AEP. Si el nivel de congestión que un avión encuentra es tal que debe bajar su velocidad por abajo del valor mínimo permitido en el rango correspondiente, se sale de la fila, vira 180 grados y comienza a volar hacia atrás a 200 nudos hasta encontrar un gap de 10 minutos o más en la fila para volver a meterse en el medio, o salirse de las 100mn si no encuentra gap. En este último caso decimos que el avión se fue a Montevideo.

1) Implementaré una simulación de Monte Carlo para la fila de aviones que te permite describir la posición de cada avión en el tiempo y en el espacio. Implementaré un mecanismo de visualización.

2) Si el promedio de arribos es de 1 avión por hora, cuánto es  $\lambda$ ?

3) Bajo este valor de  $\lambda$  y en base a una simulación suficientemente larga estimaré la probabilidad de que lleguen 5 aviones en una hora. Podés verificar tu resultado de manera analítica?

4) Simulá el sistema de arribos con  $\lambda \in \{0.02, 0.1, 0.2, 0.5, 1\}$ ? Decimos que hay congestión si un avión debe volar más lento que su velocidad máxima posible. El aumento de  $\lambda$  incrementa la frecuencia de congestiones? Se ven gráficamente? Cuál es el atraso promedio de aviones vs lo que sucedería sin congestión? Cuán frecuente es un desvío a Montevideo? Respondé en base a un número de simulaciones suficientemente grande y acompañando cada respuesta numérica con su error de estimación.

como calculo  
el error de  
estimacion?

Cada tanto sucede un episodio como este

<https://www.youtube.com/watch?v=Z7JKt0jwuXc>

o sea una interrupción, en cuyo caso el avión desvía al río, cambia el rumbo de manera instantánea en 180 grados y comienza a volar en paralelo y en dirección opuesta a la cola de aviones en el aire a 200 nudos hasta encontrar el primer hueco en la cola con un gap de al menos 10 minutos y que esté a mas de 5 mn de AEP.

Consideramos un intento por  
cada ventana de 5mn

5) Si en un día ventoso cada avión tiene 1/10 de chances de tener que interrumpir su aterrizaje, cómo cambian las estadísticas de atraso en función de  $\lambda$ ? Responder con una simulación que incluya una visualización de aviones incluyendo los que se desvían y deben buscar su hueco, y los cálculos de estadísticas de performance que tengan sentido (atraso promedio, desvíos a Montevideo, etc). Acompañá cada respuesta numérica con su error de estimación.

6) Si en un día pasa una tormenta que obliga a cerrar AEP de manera sorpresiva (o sea sin que sea anticipada por los pilotos) por media hora, cómo son las consecuencias en términos de desvíos a Montevideo, atrasos y otras métricas de calidad en función de  $\lambda$ ?

7) Dado un cierto nivel de  $\lambda$  y las velocidades mínimas y máximas de aviones ya dadas en el enunciado, se te ocurre alguna política de vuelos que mejore la performance de AEP en términos de reducir atrasos y/o eliminar desvíos a Montevideo? Hay un tradeoff entre atraso promedio y desvíos a Montevideo?

(Considerá políticas a ejecutarse en cada instante  $t$  basadas en las posiciones y velocidades de ese momento. Esto es, suponemos que los pilotos o controlador de vuelo no pueden correr simulaciones. Sus reglas de decisión deben ser sencillas y basadas en info contemporánea)

Obtené todas tus respuestas a partir de un número de simulaciones suficientemente grande como para que el error de estimación que reportes con tus respuestas sea pequeño en términos del problema. Asegurate de que tus resultados tengan sentido físico, orden de magnitud razonable, etc. Tu presentación debe tener el formato de una consultoría. Pensá los mejores gráficos y estadísticas para comunicar tus resul-

tados de manera efectiva.

### **A explorar libremente por bonus points**

Pensar modelo, simulación y visualización si los aviones aparecen de manera estocástica a 100 mn de AEP pero desde cualquier dirección.

Pensar modelo, simulación y visualización en cualquier otra dimensión del problema que te parezca útil y significativa para una mejor operación de AEP.