# TRÁBAJO PRÁCTICO 1
# A.C.N.

Catalina Aufiero Rawson, Belen D. Chen, Luna Ferreiro Grau, Benjamín Sanchez Salas

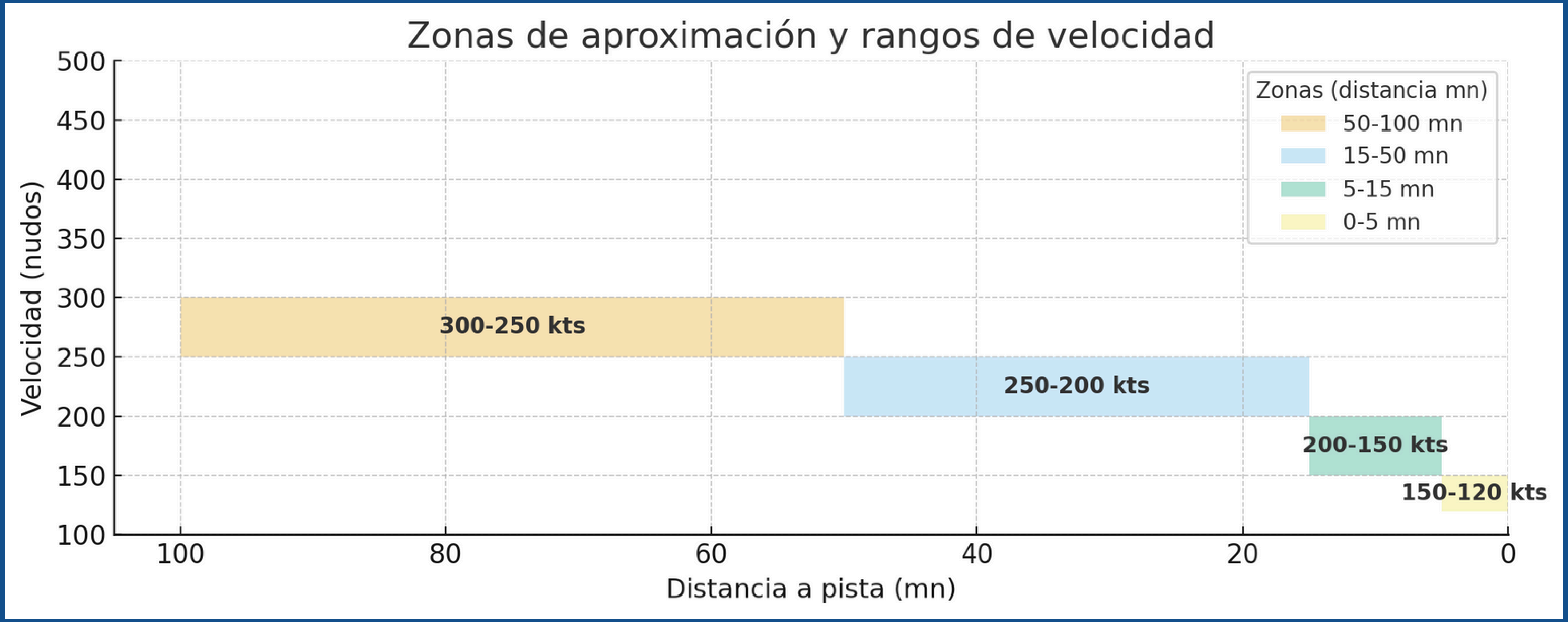
# INTRODUCCIÓN

- Contexto: congestión y operaciones en el Aeropuerto Jorge Newbery (AEP).
- Objetivo del trabajo: modelar, simular y evaluar políticas de operación.
- Simulación del proceso de aproximación desde 100 mn hasta aterrizaje (Jornada: 6 am - 00).

**Reglas clave:**

- Separación mínima de 4 minutos.
- Arribos modelados con Poisson aproximada con Bernoulli (proba λ/min)
- Desvíos si no se cumple separación o velocidad mínima

Velocidades según rango de distancia:




Parámetros físicos:

- 1 mn = 1.852 km
- 1 nudo = 1.852 km/h.

# ARQUITECTURA DE LA SIMULACIÓN

**Componentes:**

- TraficoAviones = motor de estado (listas activos/turnaround/inactivos, orden por ETA, control de separaciones, reingreso, desvíos).
- Avion = entidad con distancia_nm, velocidad_kts, estado, leader_id, tiempos de aterrizaje.
- Simulacion = orquestador que corre jornada(s), llama step y mide métricas (congestión, atrasos, desvíos).

**Flujo por minuto:**

Aparición Bernoulli → 2) Control (ordenar, ajustar velocidad, turnaround si peligro) → 3) Reingreso desde turnaround → 4) Movimiento → 5) Log de métricas.

# CICLO POR MINUTO DE LA JORNADA

1. Generación de aviones
   - Aparición de nuevo avión (proceso de Bernoulli, tasa λ)
   - Estado inicial: approach a 100 nm

2. Control de tráfico
   - Tomar “foto” de velocidades y distancias
   - Ordenar aviones activos por ETA
   - Resetear lista de “recién en turnaround”

3. Asignación de velocidad
   - Para cada avión activo:
     - Identificar límites [vmin, vmax] según la banda actual y a su líder (si existe)
     - Sin líder: asignar vmax
     - Con líder:
       - Calcular gap (distancia entre sí mismo y su líder)
       - Si gap < separación segura:
         - Reducir velocidad
         - Si < vmin → pasar a turnaround
         - Si ≥ vmin → ajustar dentro [vmin, vmax]
       - Si gap seguro → asignar vmax
   - Intentar reinsertar aviones en turnaround en huecos libres

4. Movimiento
   - Aviones activos avanzan según velocidad
   - Si llegan a 0 nm → landed
   - Aviones en turnaround retroceden a velocidad fija (200 kts)
     - Si superan distancia máxima → diverted
   - Reordenar lista de activos y actualizar punteros acorde a los movimientos del minuto.

# LÓGICA DE REINGRESO

turnaround → approach

5. Reingreso desde turnaround

- Caso 1: Sin aviones activos (simple)
  - Todos los aviones en turnaround reingresan directamente
  - Velocidad máxima, estado approach

- Caso 2: Con aviones activos (buscar gap seguro)
  - Ordenar aviones activos según ETA
  - Para cada avión en turnaround:
    - Calcular ETA posible a vmax (rápido) y vmin (lento)
    - Buscar hueco entre dos aviones consecutivos:
      - Ventana segura = [ETA anterior + separación mínima,
      - ETA siguiente - separación mínima]
      - Si cabe → calcular velocidad necesaria y reinsertar
    - Si no entra entre dos:
      - Probar antes del primer activo (si hay espacio)
      - Probar después del último activo (si hay espacio)
    - Si no encuentra hueco → permanece en turnaround

# EJERCICIO 2 Y 3

"Si el promedio de arribos es de 1 avión por hora, ¿cuánto es λ?"
"Bajo este valor de λ y con una simulación suficientemente larga, estimar la probabilidad de que lleguen 5 aviones en una hora. ¿Se puede verificar analíticamente?"

Queremos que:

$$E[N] = 1 arribo/hora$$

Como el modelo usa Bernoulli por minuto:

$$E[N] = n \times p = 60 \times \lambda = 1$$

Entonces:

$$\lambda = 1/60 \approx 0.0167$$

**Interpretación: probabilidad ≈ 1.67% de aparición por minuto.**

**Modelo analítico:**
Cada minuto = Bernoulli(λ), con n=60
Total de arribos en una hora:

$$N \sim Binomial(n = 60, p = \lambda)$$

**Probabilidad exacta:**

$$P(N = 5) = \binom{60}{5} \lambda^5 (1 - \lambda)^{55}$$

**Con λ = 1/60**

$$P(N = 5) \approx 0.00279 (\sim 0.28\%)$$

# RESULTADOS EJ 3

- Se corrieron simulaciones de jornadas completas con λ=1/60.
- Hicimos la prueba de arribos=apariciones y arribos=aterrizajes:
  - p̂(Y=5) = (# horas con 5 apariciones) / (horas_totales)
  - p̂(X=5) = (# horas con 5 aterrizajes) / (horas_totales)

Error estándar (Monte Carlo): $SE = \sqrt{\frac{\hat{p}(1-\hat{p})}{n}}$

IC 95% (normal): $\hat{p} \pm 1.96 \times SE$

| Días simulados | Horas totales | p̂(Y=5) | IC95% Y | p̂(X=5) | IC95% X |
|---|---|---|---|---|---|
| 90 | 1620 | 0.002469 | [0.000052, 0.004886] | 0 | [0.00000, 0.00000] |
| 10000 | 180000 | 0.00268 | [0.00244, 0.00292] | 0.00135 | [0.00118, 0.00152] |
| 20000 | 360000 | 0.00273 | [0.00256, 0.00290] | 0.00141 | [0.00128, 0.00153] |

- Al aumentar la cantidad de días simulados, la estimación de P(Y=5) se estabiliza y converge al valor analítico obtenido con la distribución Binomial (≈0.00279).
- La probabilidad de 5 apariciones por hora coincide con el modelo teórico, confirmando que la consigna de este ejercicio se refiere a arribos (apariciones) y no a aterrizajes. En cambio, la probabilidad de 5 aterrizajes por hora es menor, ya que la dinámica del sistema (colas, separaciones y desvíos) filtra las apariciones.

# MÉTRICAS DE SIMULACIÓN

**Atraso**

- Diferencia entre el tiempo real de aterrizaje y el tiempo esperado sin congestión (volando siempre a la velocidad máxima por banda).
- Se promedia sobre todos los aviones que aterrizan.

**Congestión**

- Un avión está en congestión si debe volar más lento que su velocidad máxima posible en su banda de distancia.
- Se mide como la proporción de minutos en congestión sobre el total de minutos de vuelo.

**Desvíos**

- Un avión se desvía a Montevideo si no logra reingresar a la cola luego de tener que salir (pasar a 'turnaround') antes de pasarse de las 100 nm.
- La tasa de desvíos es la proporción de aviones desviados sobre el total de aviones que aparecieron.

**IC95 =** media $\pm$ 1.96 $\times$ SE ( tq SE = sd / $\sqrt{n}$ )

- En qué intervalo va a caer la métrica, con un 95% de confianza.

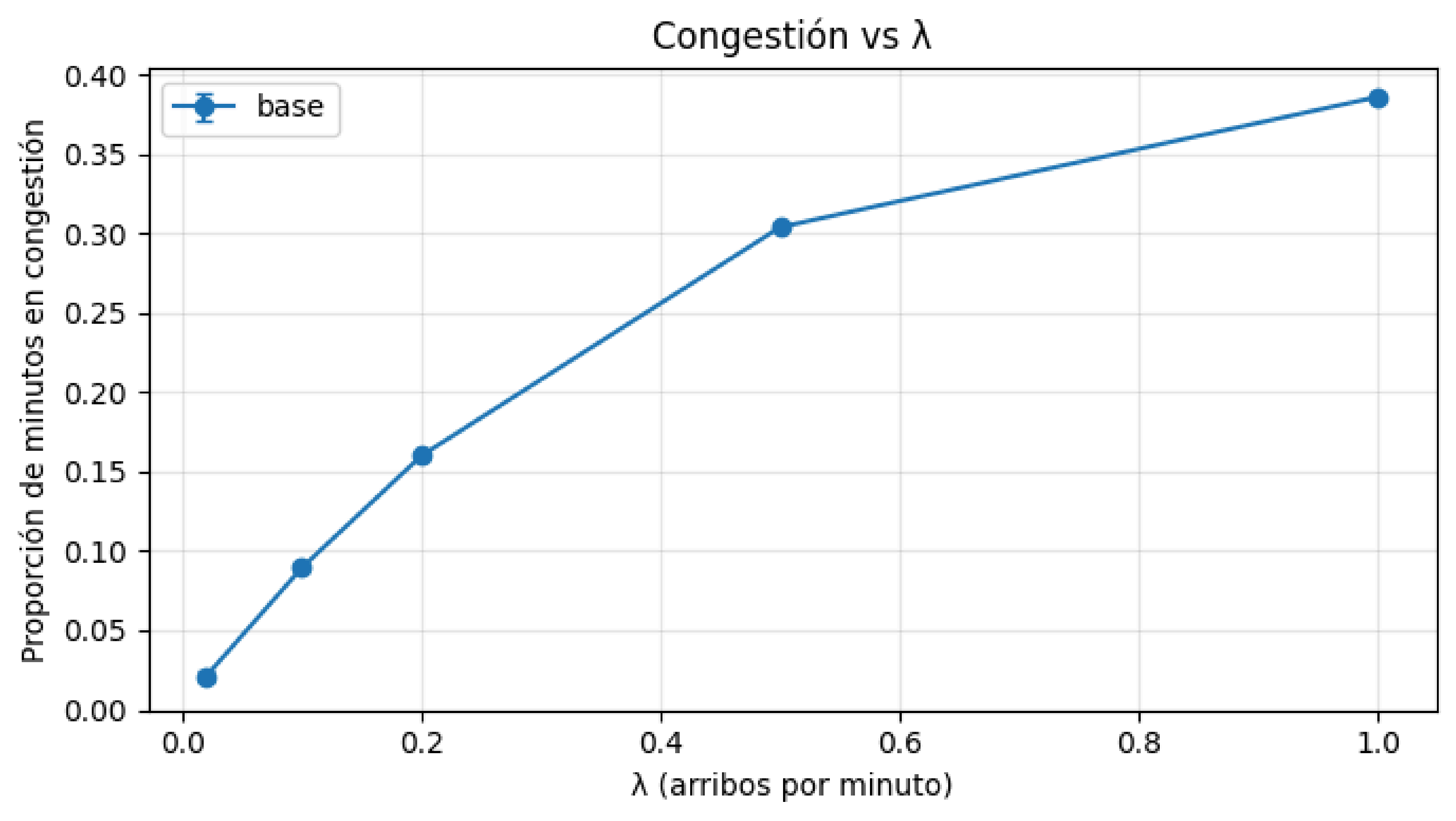
# EJERCICIO 4: EXPERIMENTOS BASE

Simular el sistema de arribos con tasas de llegada con **λ ∈ {0.02, 0.1, 0.2, 0.5, 1}**

1. **¿El aumento de λ incrementa la frecuencia de congestiones? ¿Se observa gráficamente?**

- Mayor λ → más probabilidad de apariciones por minuto; como la capacidad del carril y AEP es limitada se satura, y crece la congestión (aviones reducen velocidad), aumentan los atrasos promedio.

| λ | Promedio de congestión | IC95 |
|---|---|---|
| 0.02 | 0.01916 | [0.01875 – 0.01958] |
| 0.1 | 0.09087 | [0.09050 – 0.09125] |
| 0.2 | 0.16184 | [0.16152 – 0.16215] |
| 0.5 | 0.30422 | [0.30400 – 0.30444] |
| 1 | 0.38616 | [0.38616 – 0.38616] |



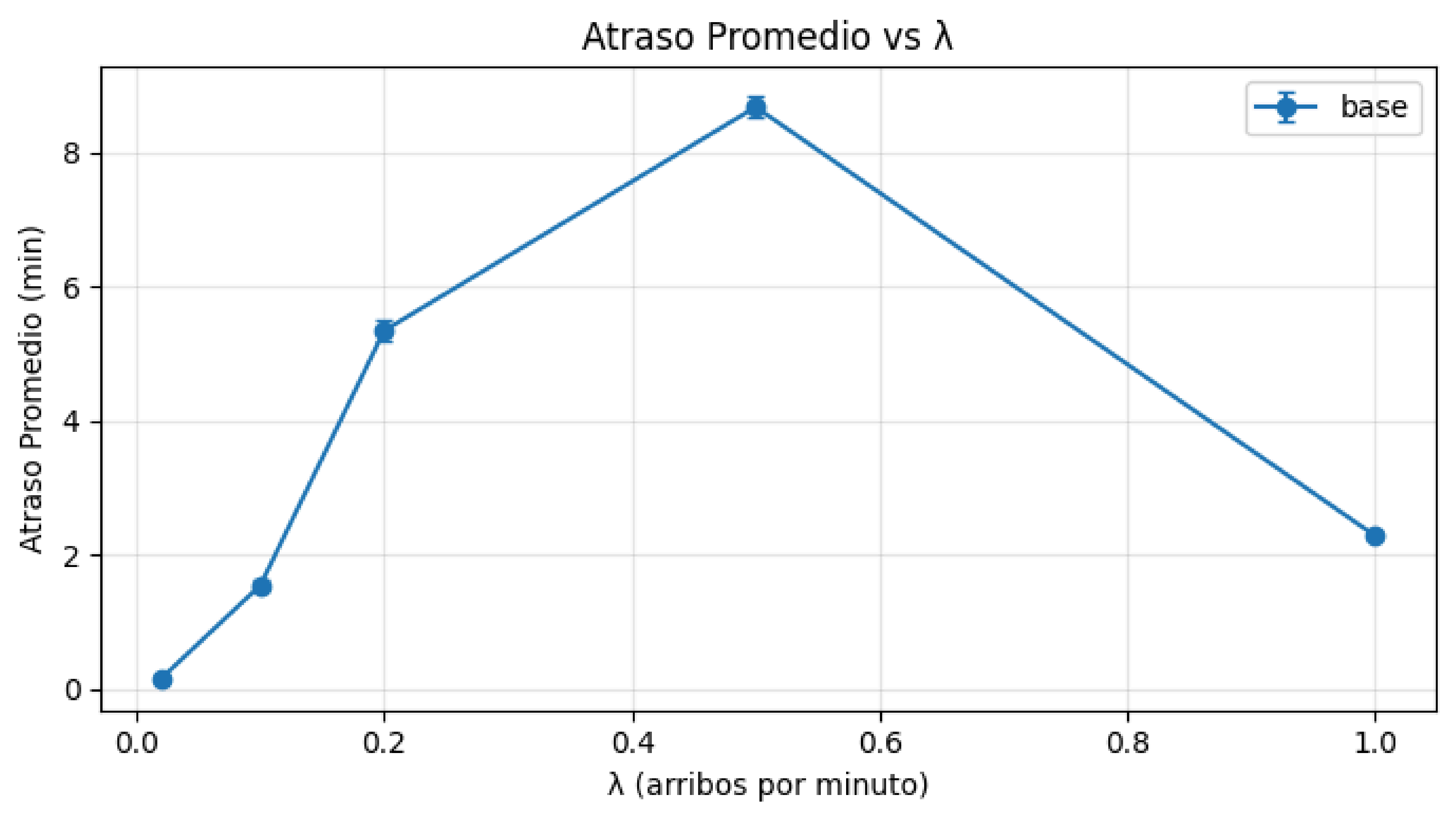
# EJERCICIO 4: EXPERIMENTOS BASE

Simular el sistema de arribos con tasas de llegada con **λ ∈ {0.02, 0.1, 0.2, 0.5, 1}**

## 2. ¿Cuál es el atraso promedio de los aviones respecto al escenario sin congestión?

- Mayor lambda → más aviones → más reducen la velocidad → más atraso acumulado.
- **λ=1:** Hasta que el sistema se satura, la cola se vuelve insostenible: muchos aviones no pueden aterrizar => se desvían (atraso promedio se hace solo sobre los aviones que efectivamente aterrizan, entonces baja).

| λ | Delay promedio | IC95 |
|---|---|---|
| 0.02 | 0.133 | [0.129 – 0.137] |
| 0.1 | 1.549 | [1.536 – 1.562] |
| 0.2 | 5.413 | [5.391 – 5.435] |
| 0.5 | 8.663 | [8.641 – 8.686] |
| 1 | 2.288 | [2.288 – 2.288] |



# EJERCICIO 4: EXPERIMENTOS BASE

Simular el sistema de arribos con tasas de llegada con **λ ∈ {0.02, 0.1, 0.2, 0.5, 1}**

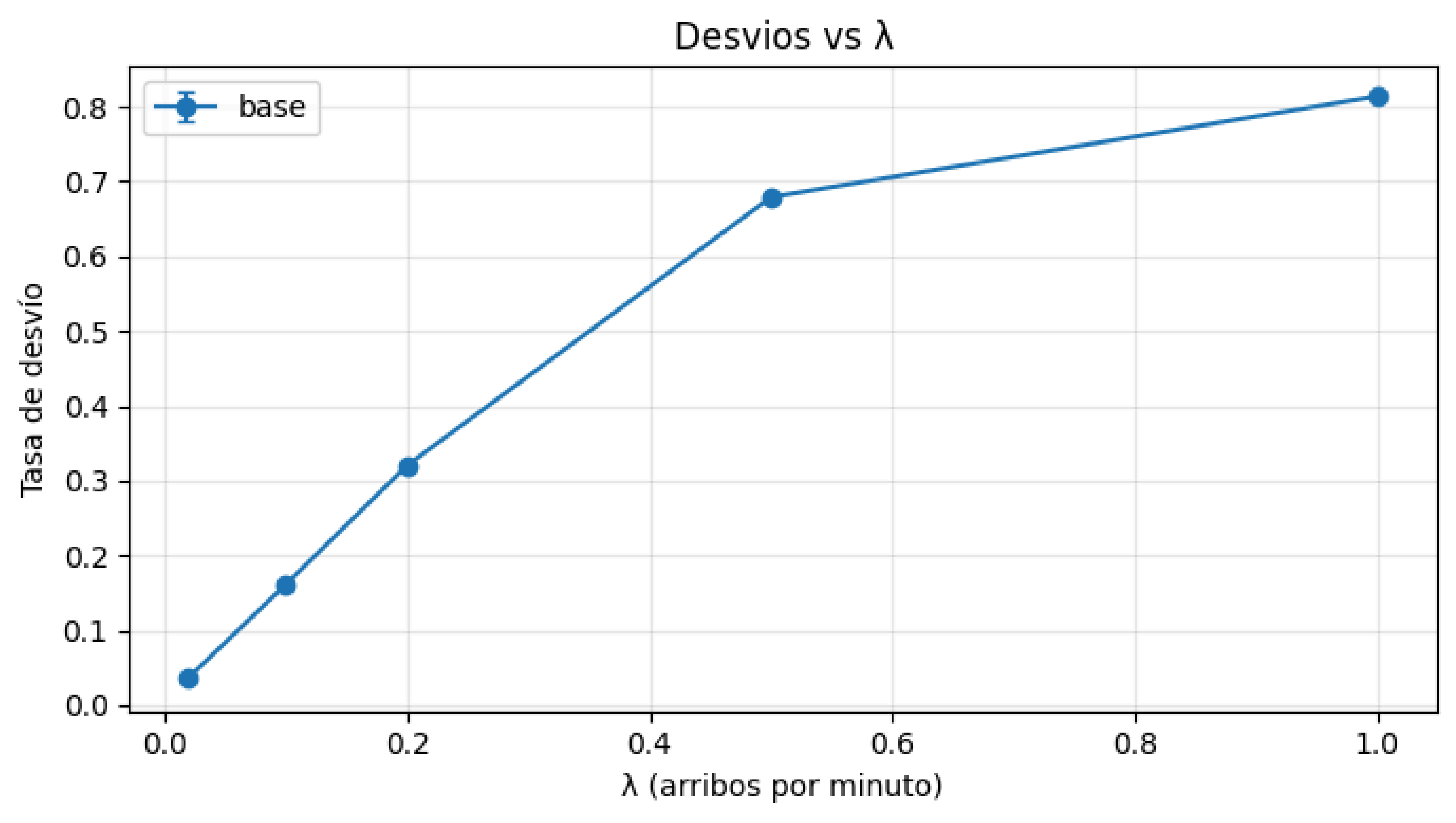
## 3. ¿Con qué frecuencia ocurre un desvío a Montevideo?

**Relación entre congestión, atraso y desvíos**

- λ ↑ → congestión ↑ → atraso ↑ → desvíos ↑
- λ muy alto → desvíos ↑↑ → atraso promedio ↓ (por efecto estadístico)

- Con λ bajo hay muy pocos desvíos, pero llegan a desviarse un 80% de los aviones con λ = 1. Esto se condice con la interpretación de la disminución de los atrasos promedio.

| **λ** | **Desvíos promedio** | **IC95** |
|---|---|---|
| 0.02 | 0.0365 | [0.0357 – 0.0373] |
| 0.1 | 0.1624 | [0.1617 – 0.1630] |
| 0.2 | 0.3204 | [0.3198 – 0.3209] |
| 0.5 | 0.6786 | [0.6784 – 0.6788] |
| 1 | 0.8139 | [0.8139 – 0.8139] |



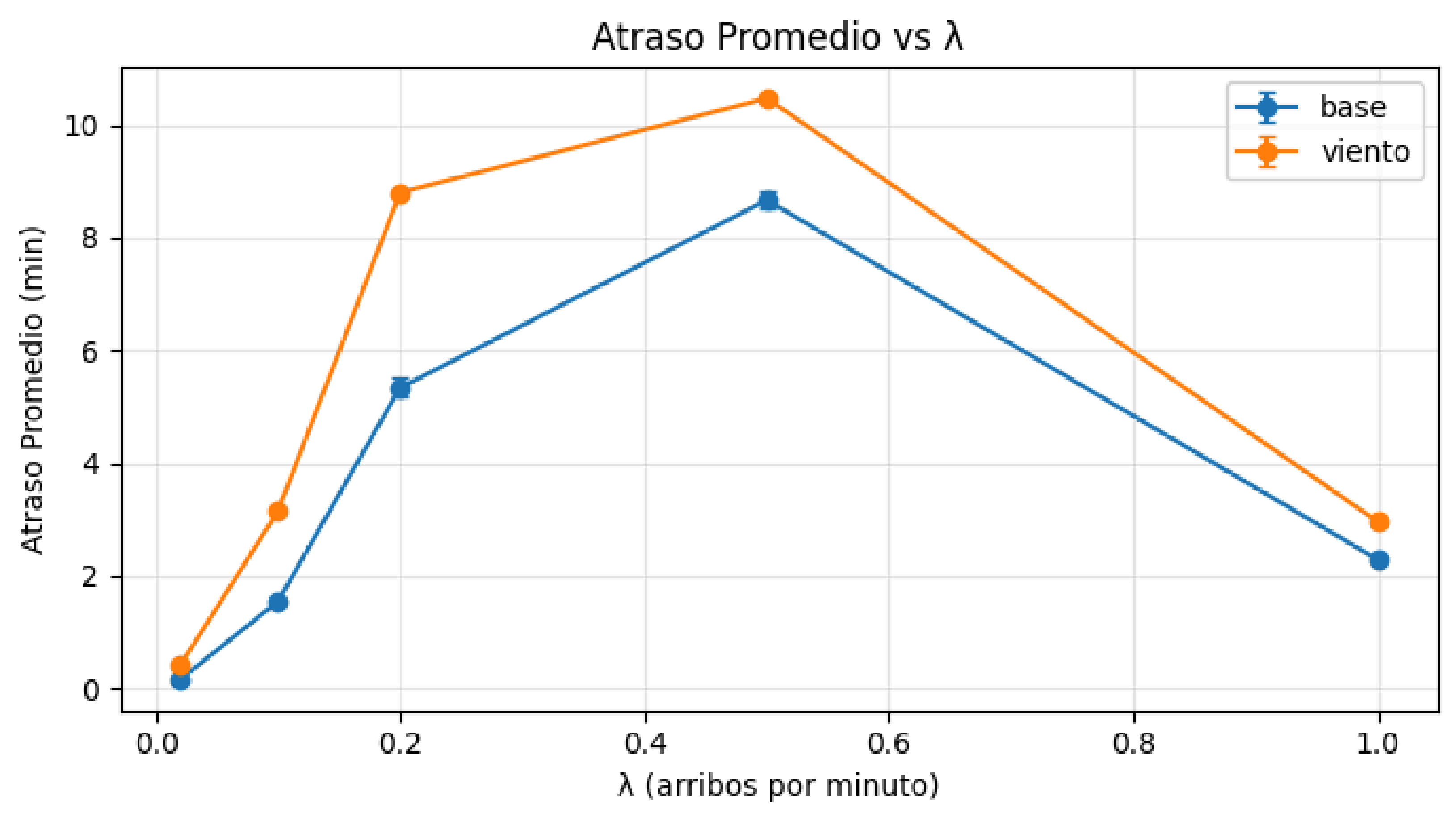
# EJERCICIO 5: EXPERIMENTOS VIENTO

Simular el sistema de arribos con tasas de llegada con **λ ∈ {0.02, 0.1, 0.2, 0.5, 1}**

Caso: en condiciones ventosas, cada avión tiene 10% de probabilidad de <u>interrumpir</u> su aterrizaje (está por aterrizar y se pasa a 'turnaround', con las mismas reglas que si se desviara por separación).

## Cómo cambian las estadísticas de ATRASO en función de λ

- En este caso, el atraso se comporta de manera similar con respecto a lambda, pero es siempre mayor que para el caso base. Esto tiene sentido porque se producen más "turnarounds" que tienen ~100 nm para reingresarse (más posibilidad de reingreso, menos riesgo de desvío).



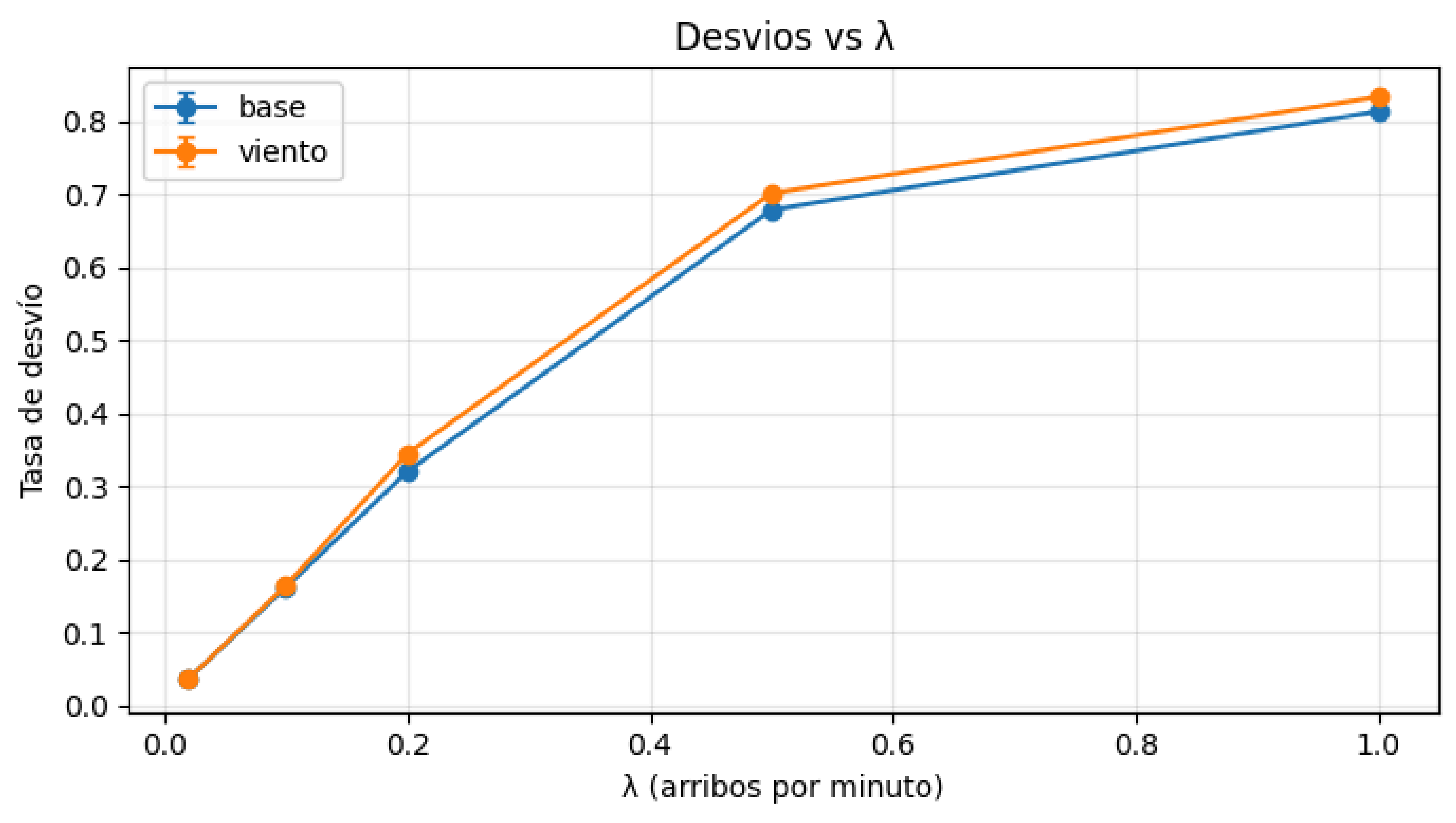

| λ | Delay promedio | IC 95% |
|---|---|---|
| 0.02 | 0.414 | [0.404 – 0.423] |
| 0.1 | 3.152 | [3.129 – 3.175] |
| 0.2 | 8.802 | [8.769 – 8.835] |
| 0.5 | 10.477 | [10.450 – 10.505] |
| 1 | 2.96 | [2.914 – 3.006] |

# EJERCICIO 5: EXPERIMENTOS VIENTO

Simular el sistema de arribos con tasas de llegada con **λ ∈ {0.02, 0.1, 0.2, 0.5, 1}**

## Cómo cambian las estadísticas de DESVÍO en función de λ

- En este caso, el desvío también se comporta de manera similar con respecto a lambda, pero es siempre un poco mayor que para el caso base, ya que se agrega un porcentaje de aviones alejandose del AEP.




| λ | Desvíos promedio | IC 95% |
|---|---|---|
| 0.02 | 0.0365 | [0.0357 – 0.0373] |
| 0.1 | 0.1639 | [0.1633 – 0.1645] |
| 0.2 | 0.3447 | [0.3441 – 0.3453] |
| 0.5 | 0.7017 | [0.7015 – 0.7019] |
| 1 | 0.8338 | [0.8336 – 0.8340] |

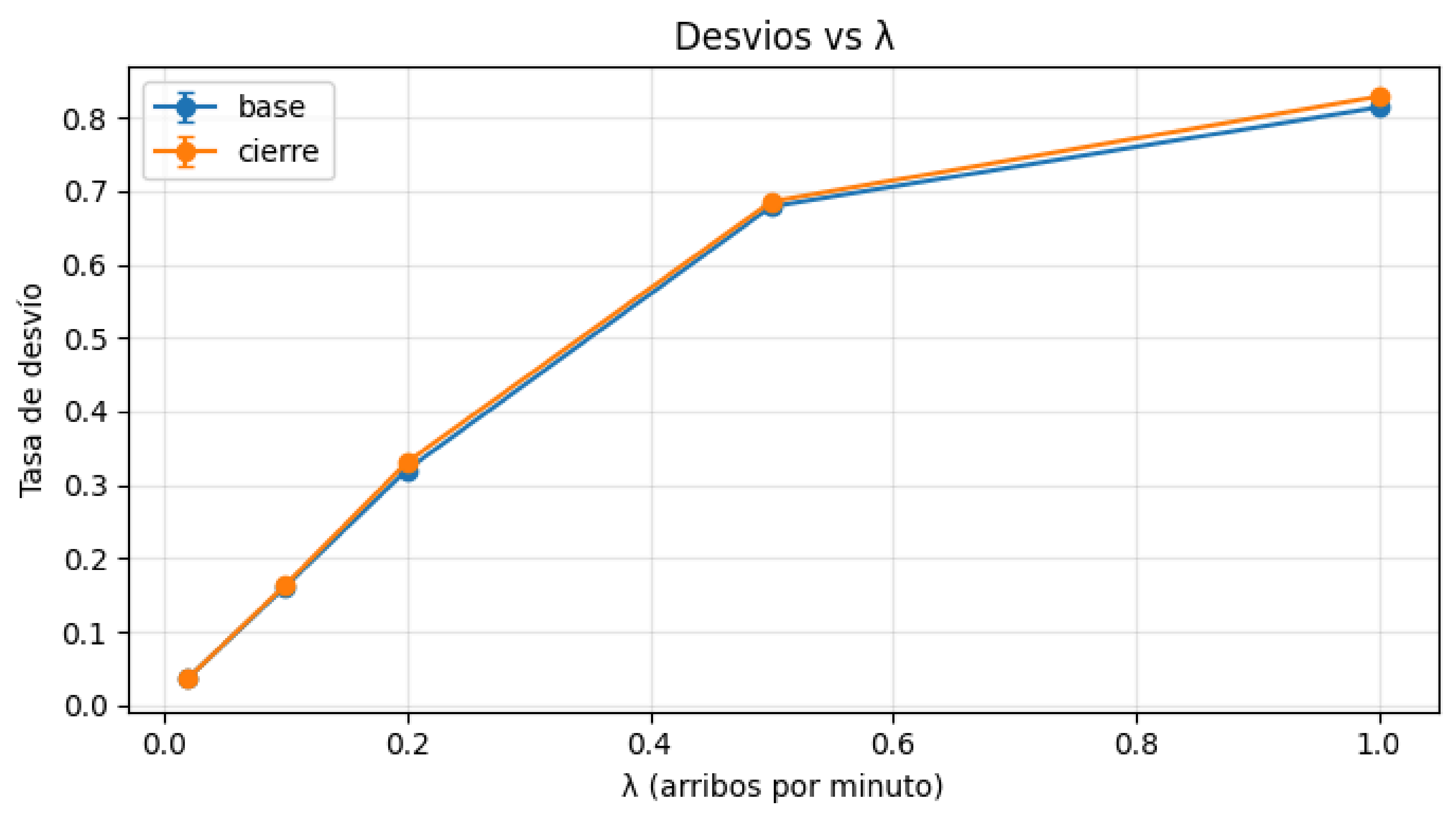
# EJERCICIO 6: EXPERIMENTOS CIERRE AEP

Simular el sistema de arribos con tasas de llegada con **λ ∈ {0.02, 0.1, 0.2, 0.5, 1}**

Caso: cierre sorpresivo de AEP (30 min), por lo que los aviones que llegarían en ese lapso deben interrumpir su aterrizaje (pasarse a 'turnaround', reingresándose si encuentra un gap en el que llegue cuando AEP haya reabierto)..

## Cómo cambian las estadísticas de DESVÍO en función de λ

La tasa de desvíos es prácticamente igual para todos los lambdas, excepto para λ=1 donde para el caso de cierre da un poco mayor. Sin embargo, la diferencia es mínima. De hecho, tiene menos impacto en los desvíos que el caso de viento.



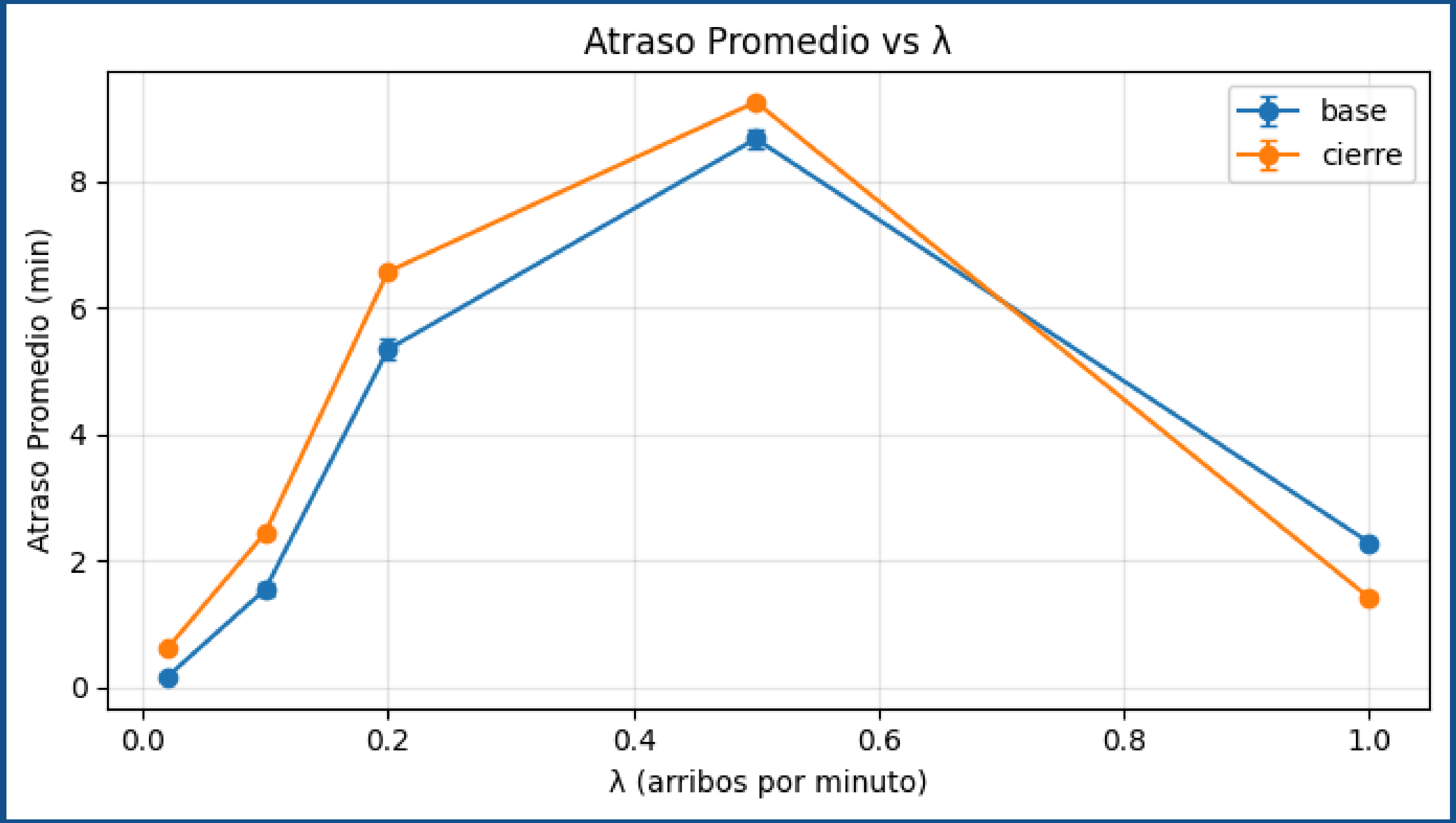

| λ | Desvíos promedio | IC95 (bajo – alto) |
|---|---|---|
| 0.02 | 0.0365 | [0.0357 – 0.0373] |
| 0.1 | 0.1635 | [0.1628 – 0.1641] |
| 0.2 | 0.3304 | [0.3299 – 0.3310] |
| 0.5 | 0.6857 | [0.6854 – 0.6859] |
| 1 | 0.8287 | [0.8287 – 0.8287] |

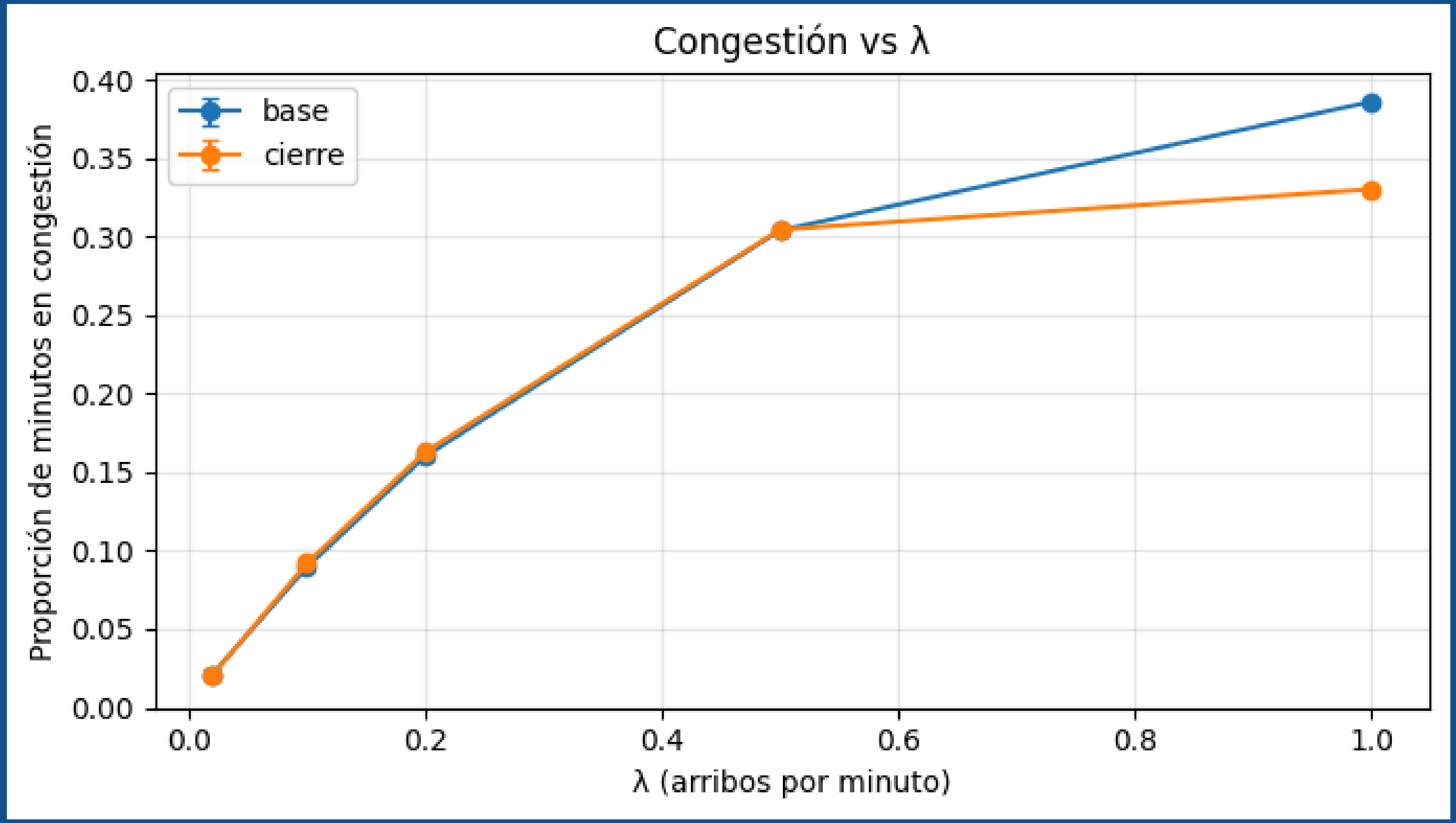
# EJERCICIO 6: EXPERIMENTOS CIERRE AEP

Simular el sistema de arribos con tasas de llegada con
**λ ∈ {0.02, 0.1, 0.2, 0.5, 1}**

## Cómo cambian las estadísticas de ATRASO en función de λ

En este caso, tanto el atraso como la congestión con respecto al base arranca siendo mayor, pero cuando lambda es muy grande pasa a ser menor, lo que puede deberse a que crece la cantidad de aviones desviados/'diverted'.



# EJERCICIO 7:

**Política 1: Metering anticipado**

- Cada avión ajusta su velocidad para mantener un gap objetivo con el líder.
- Si el gap cae bajo el mínimo de seguridad ⇒ frenar o mandar a turnaround.
- Si hay aire de sobra ⇒ ir a vmax.

Efecto: reduce compresión y atrasos, mantiene desvíos bajos.

**Política 2a: Reingreso priorizando riesgo de desvío**

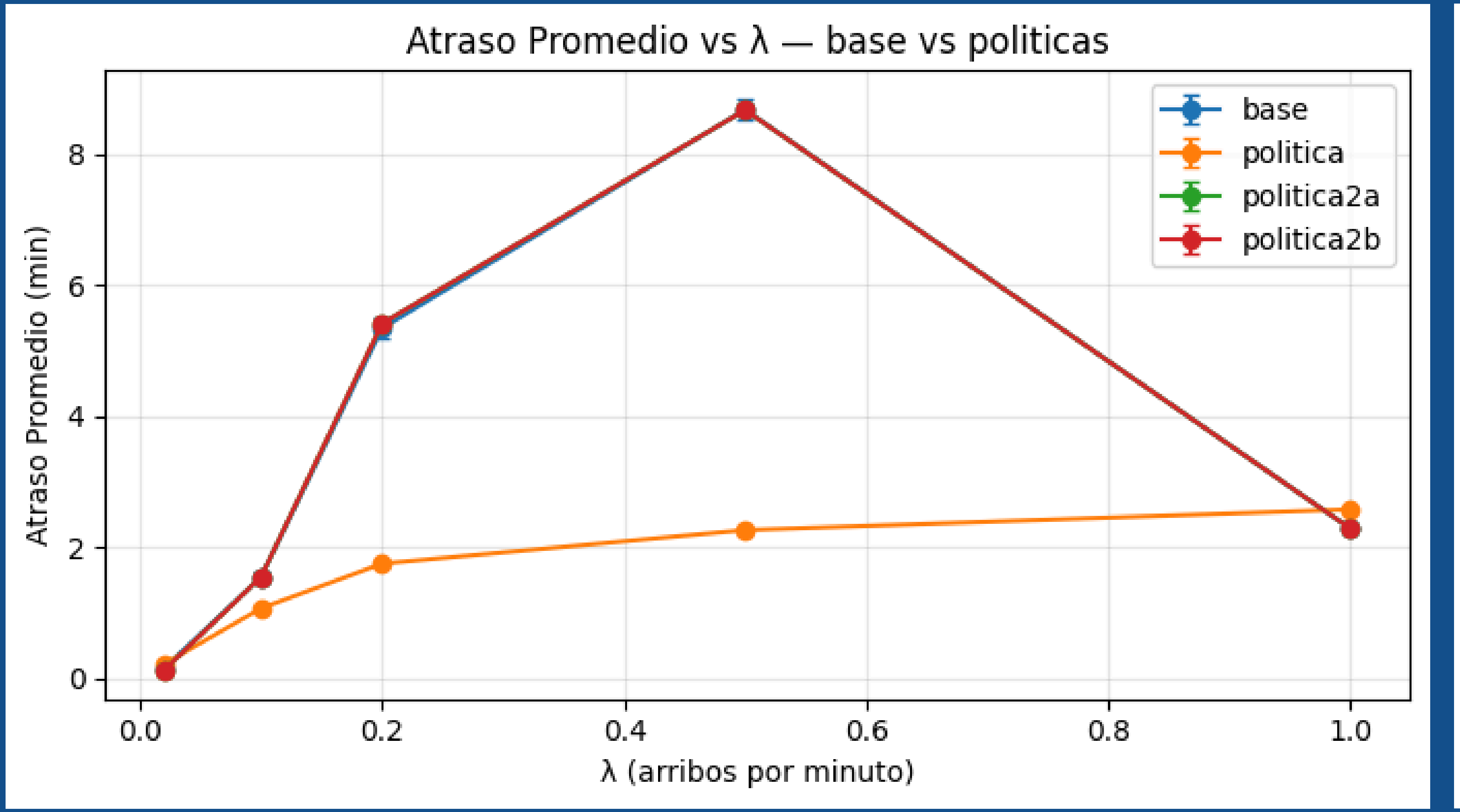
- En turnaround entran primero los más lejos de AEP (más riesgo de desvío).
- Se reinsertan buscando huecos globales con separación mínima.

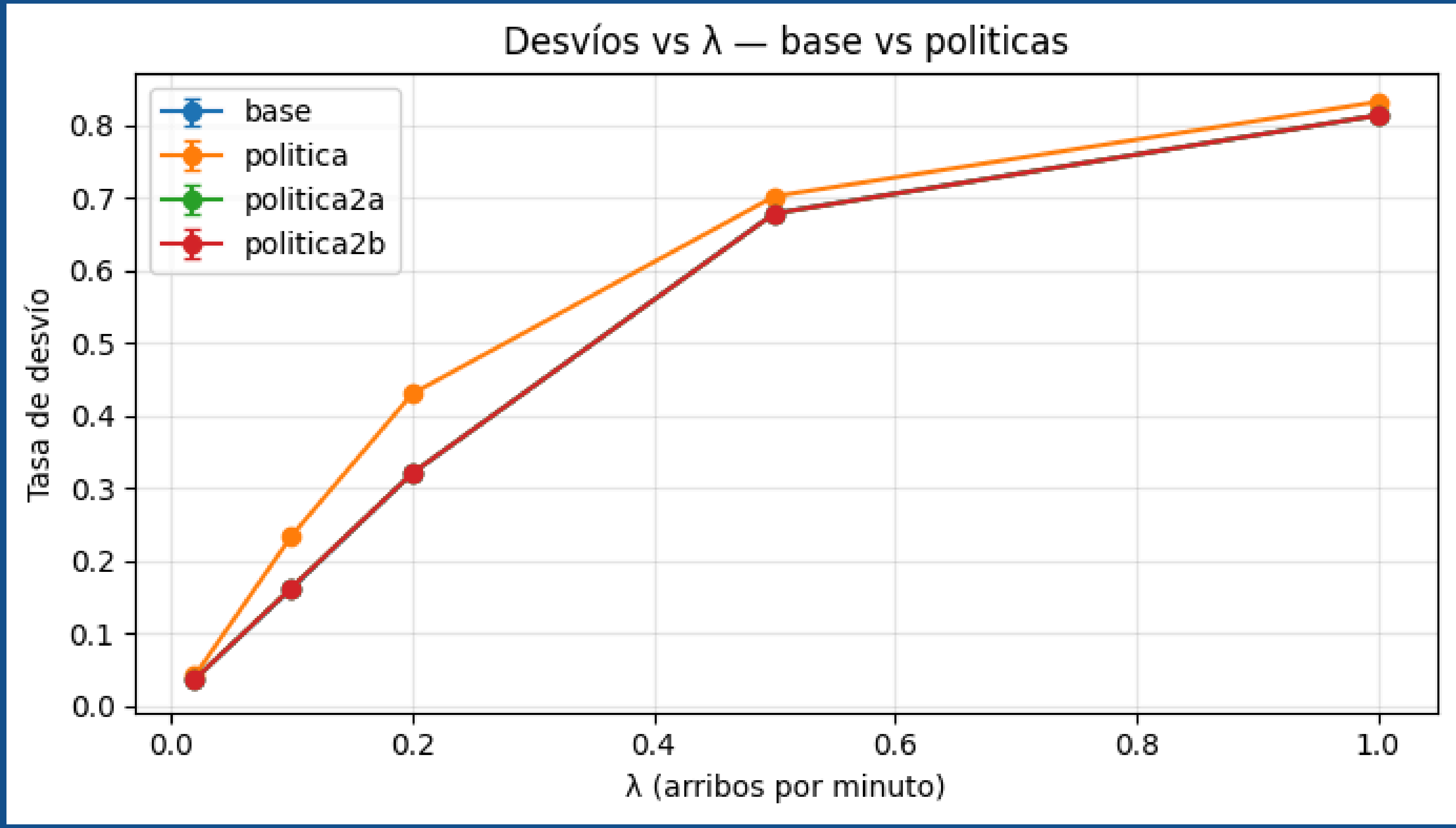
Efecto: baja fuerte los desvíos, pero puede aumentar atrasos.

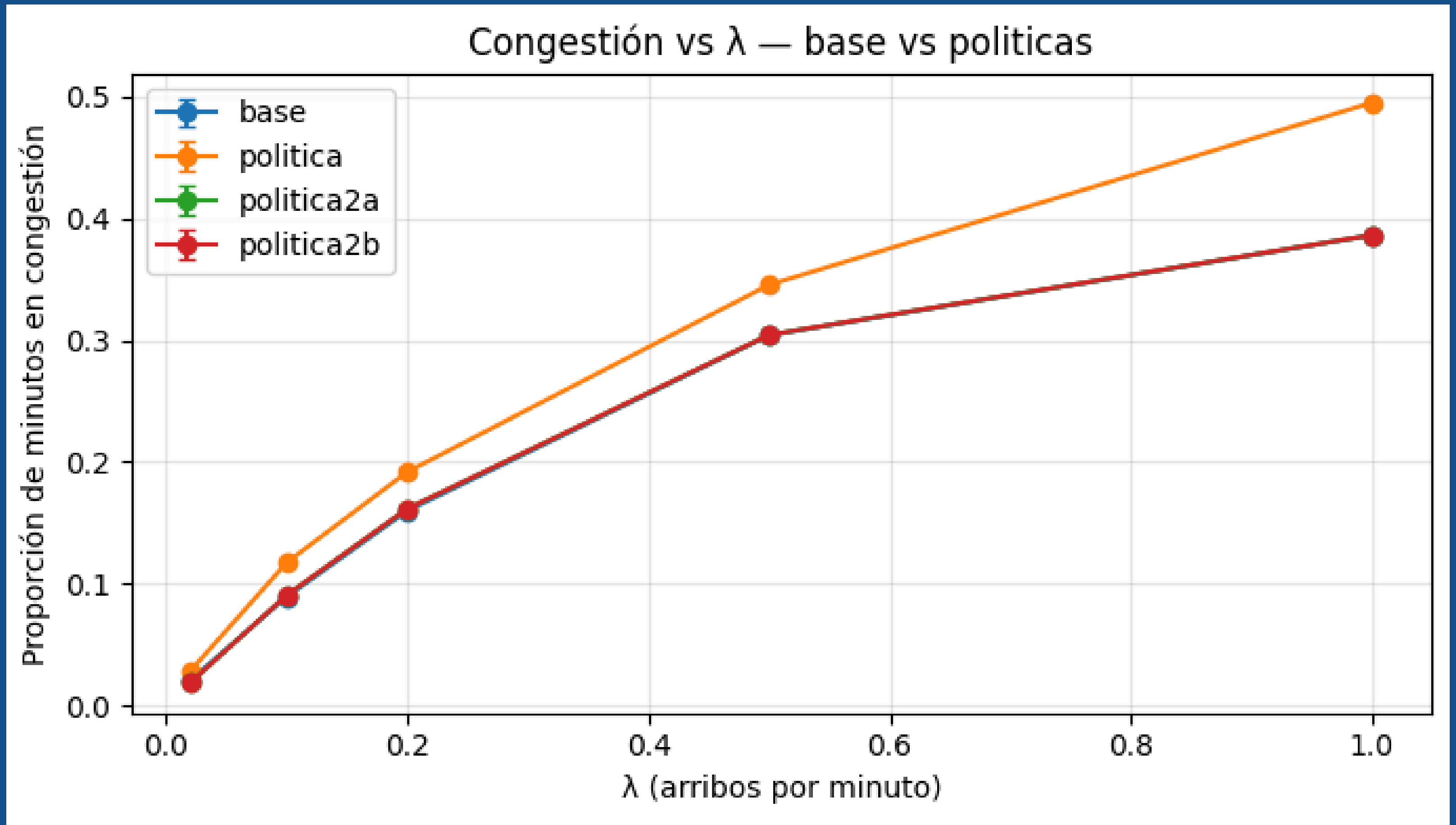
**Política 2b — Reingreso FIFO**

- Reingreso en el orden en que llegaron al turnaround.
- También usan huecos globales con separación mínima.

Efecto: equilibra: atrasos y desvíos en nivel intermedio.



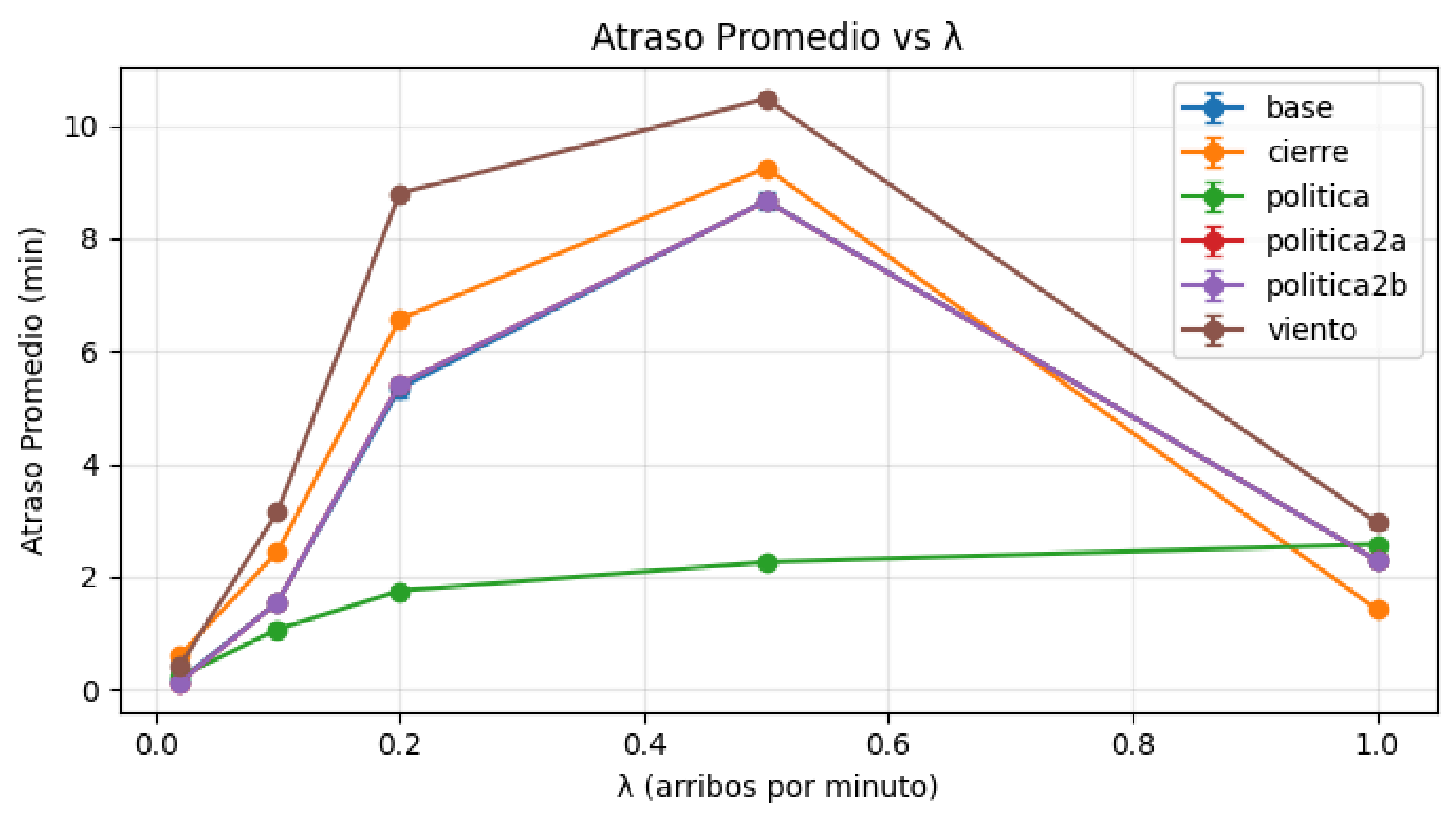



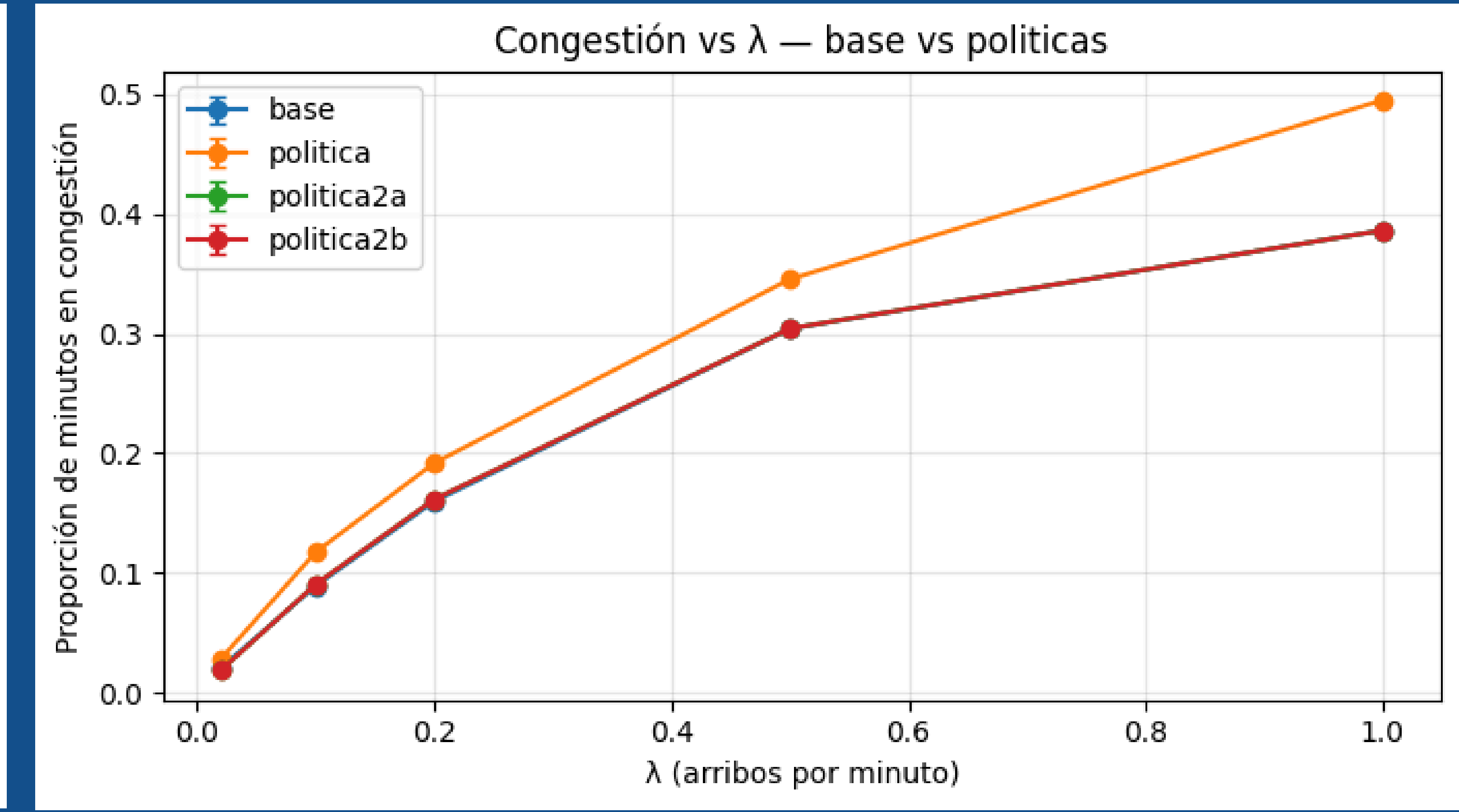

**Política 1**: reduce significativamente los atrasos y aumenta levemente los desvíos. También aumenta la congestión.

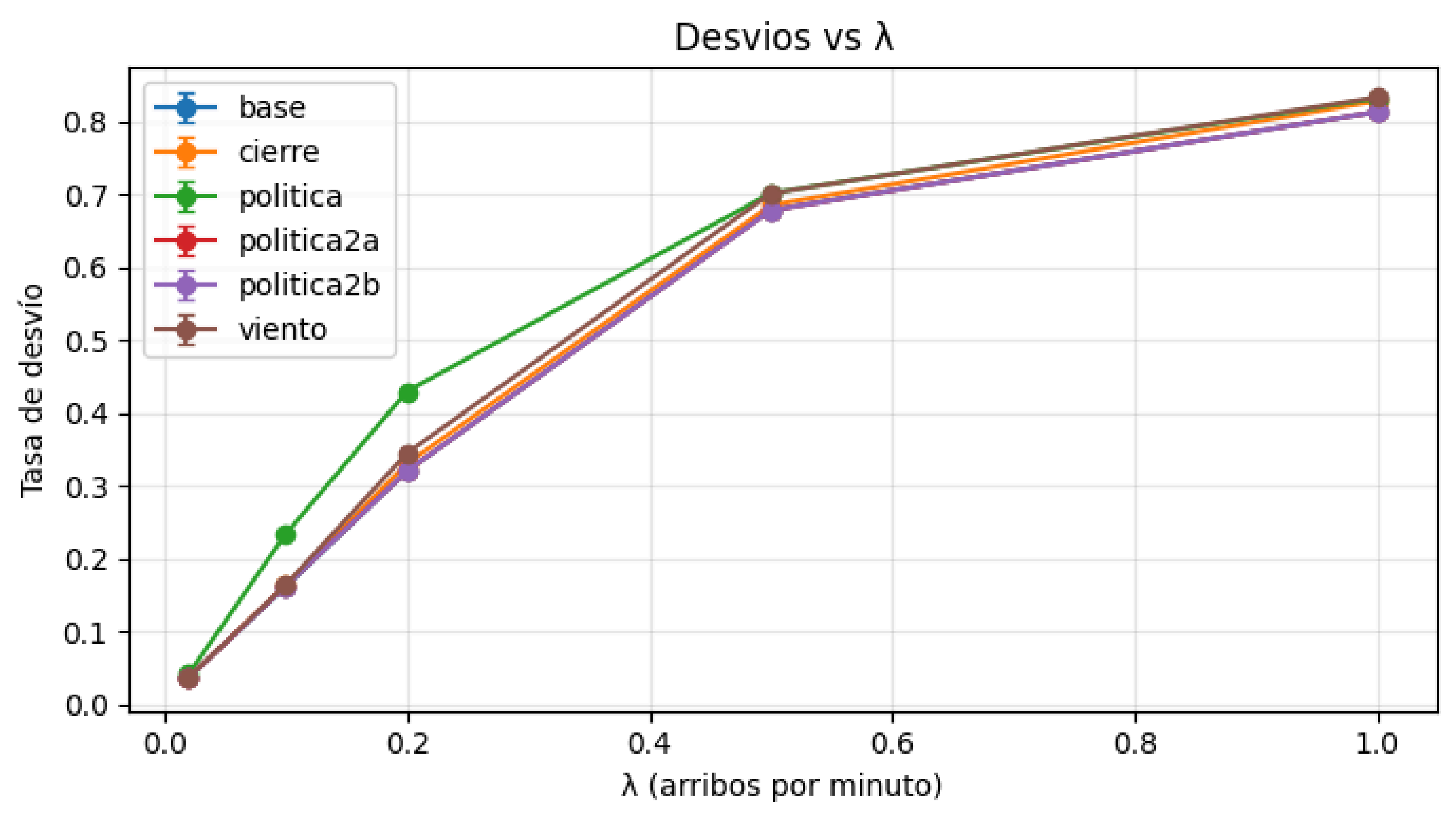
**Política 2a y 2b:** Los valores de atraso, congestión y desvío coinciden con el escenario base en todos los niveles de λ. Conclusión: no genera mejoras.

Hay un tradeoff entre atraso promedio y desvíos a Montevideo.

# CONCLUSIÓN FINAL




Podemos ver que tanto en atraso promedio como en congestión, la simulación usando la política obtuvo los mejores resultados. El trade-off de esto es que más que anda con los lambdas chicos, los desvíos son un poco mayores cuando se utiliza la política, pero es una pequeña diferencia en comparación con la diferencia que hay en atraso y congestión.