

# Un modelo de optimización dinámica para la planificación eficiente de tareas de mantenimiento de aviones

Carlos Lagos Salgado  
**Felipe Delgado**  
Mathias Klapp

CCIT19  
Santiago, Chile  
9 de octubre, 2019

# Motivación



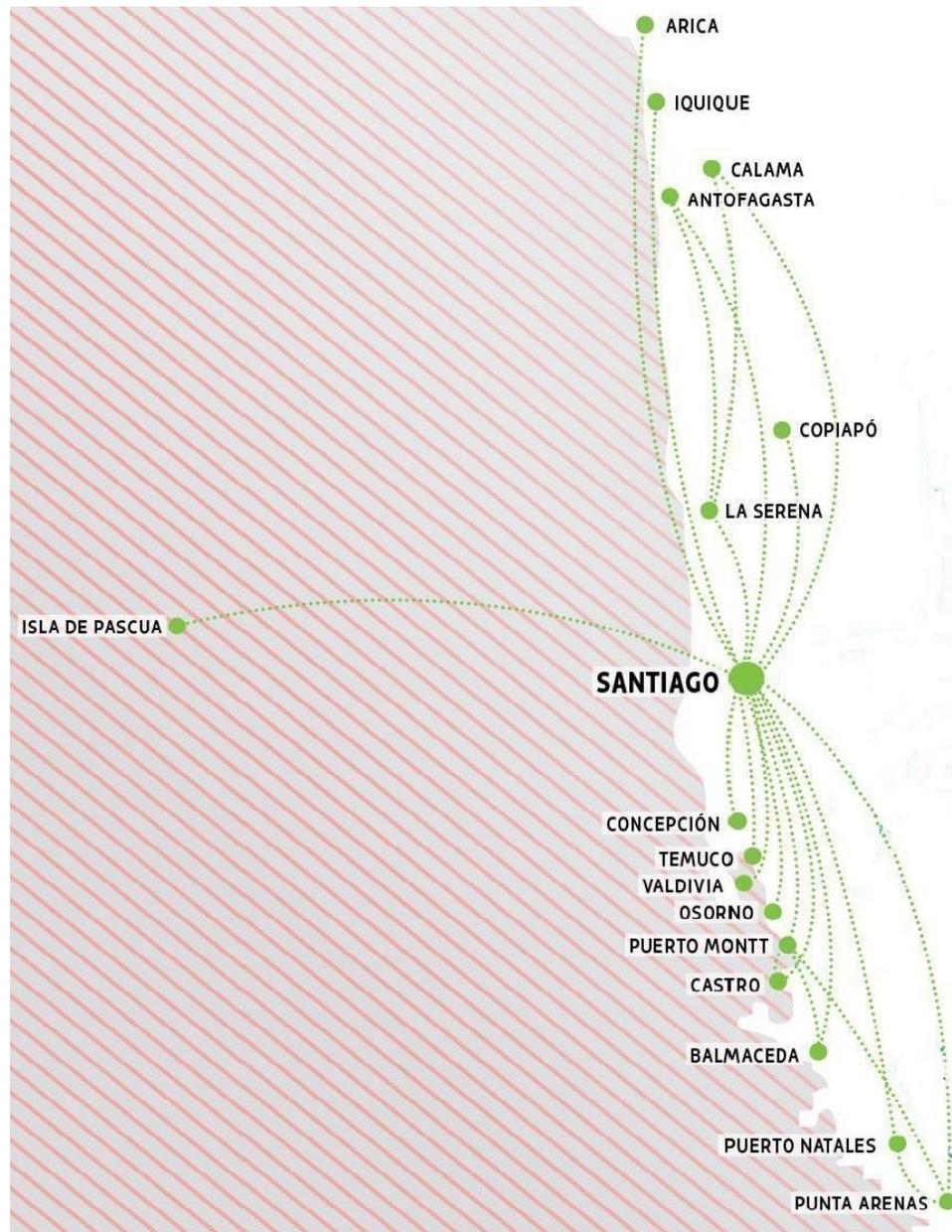
- El mayor grupo de aerolíneas de Latinoamérica
- Flota: 315 aviones

## Chile

- Flota: 26 A320 FAM
- 8,2 MM pax anuales
- Participación de mercado: 61%
- Hub: Santiago

Fuente: LATAM y Junta Aeronáutica Civil (JAC)

94% de los  
vuelos  
domésticos  
tienen  
origen/destino  
Santiago



Fuente: Junta Aeronáutica Civil (JAC)

# Motivación

Hub: Santiago

## Base de mantenimiento

- Única base de la aerolínea en Chile
- Capacidad
  - 30 aviones de un pasillo (A320 FAM) o 10 aviones de doble pasillo (B767 – B787)
- Turno noche dedicado a la flota doméstica

# Reemplazo de mecánicos no resulta tarea fácil para aerolíneas

La inminente escasez ya llevó a las **empresas aéreas** a pagar bonificaciones con el fin de captar técnicos de mantenimiento de aviones recién salidos de la escuela de oficios.



Para el 2027, la demanda de mecánicos calificados superará en un 9% la oferta, según un estudio de la firma consultora Oliver Wyman. (Foto: Bloomberg)

**AGENCIA BLOOMBERG** / 16.03.2018 - 02:58 AM

# Reemplazo de mecánicos no resulta tarea fácil para aerolíneas

La inminente escasez ya llevó a las **empresas aéreas** a pagar bonificaciones con el fin de captar técnicos de mantenimiento de aviones recién salidos de la escuela de oficios.

Para el 2027, la demanda de mecánicos calificados superará en un 9% la oferta, según un estudio de la firma consultora Oliver Wyman. (Foto: Bloomberg)



Para el 2027, la demanda de mecánicos calificados superará en un 9% la oferta, según un estudio de la firma consultora Oliver Wyman. (Foto: Bloomberg)

AGENCIA BLOOMBERG / 16.03.2018 - 02:58 AM

# Agenda

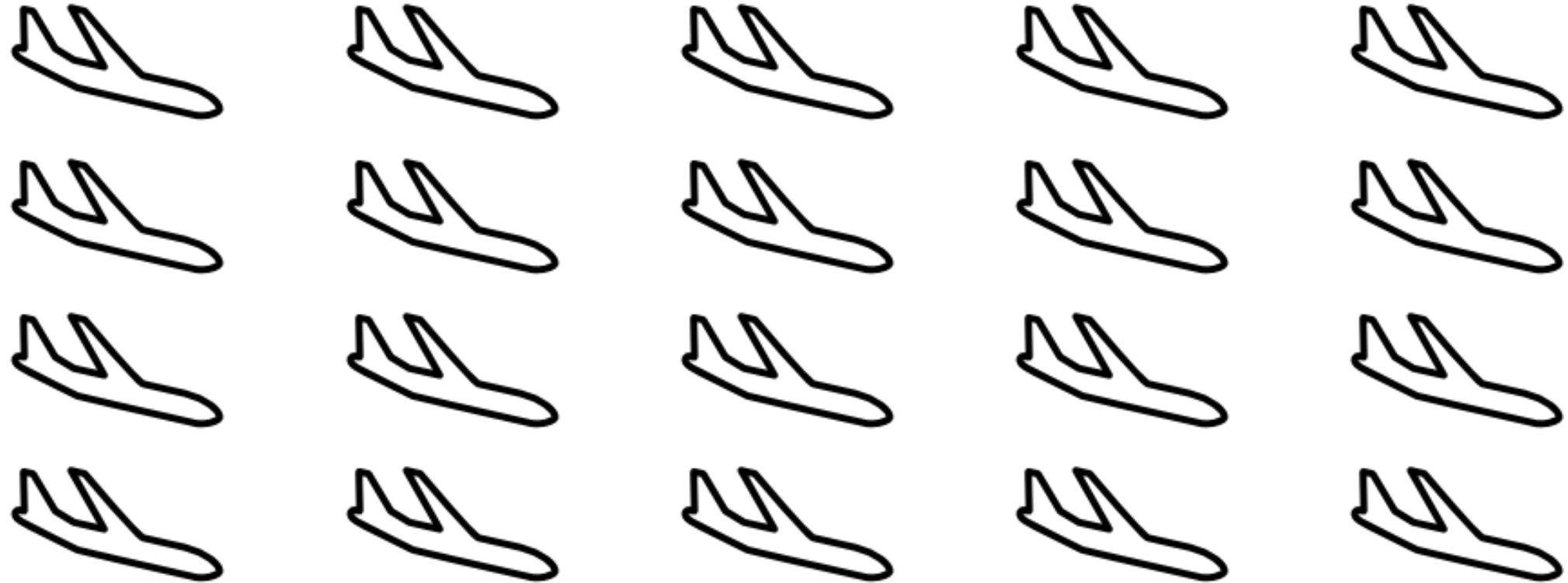
1. El problema
2. Proceso de Decisión Markoviano
3. Modelo MIP determinístico
4. Políticas o heurísticas
5. Experimento
6. Resultados
7. Conclusiones

# 1. El problema

# El problema

Flota

Flota doméstica homogénea



# El problema

Capacidad de la base

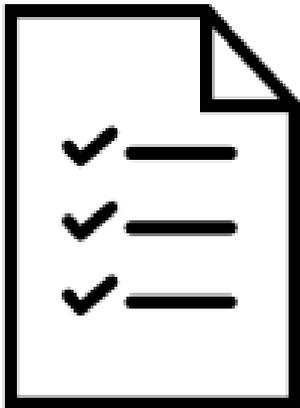
Flota doméstica homogénea



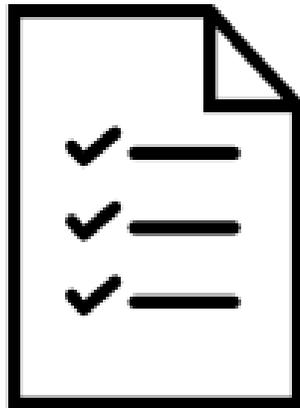
# El problema

## Tareas

Avión 1

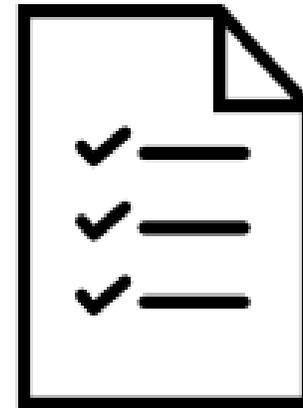


Avión 2



...

Avión N



Cada tarea tiene:

- Fecha de aparición (*release date*)
- Fecha de vencimiento (*due date*)
- Requerimiento de recursos
- Requerimiento de tiempo de procesamiento

# El problema

## Tareas



### Tarea crítica

- Si no se realiza antes del vencimiento, el avión queda fuera de operación dicho día
- No importa cuantas tareas críticas no venzan, una es suficiente para dejar el avión en tierra (*aircraft on ground - AOG*)

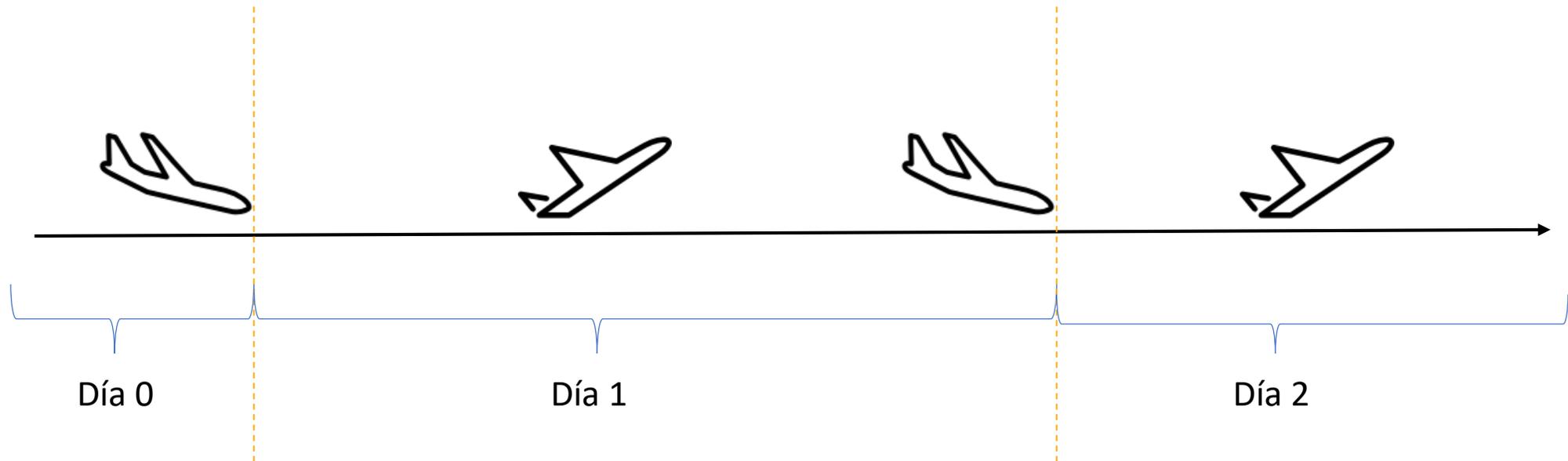


### Tarea normal

- Si no se realiza antes del vencimiento, el avión continúa su operación normal dicho día y se externaliza la realización de la tarea

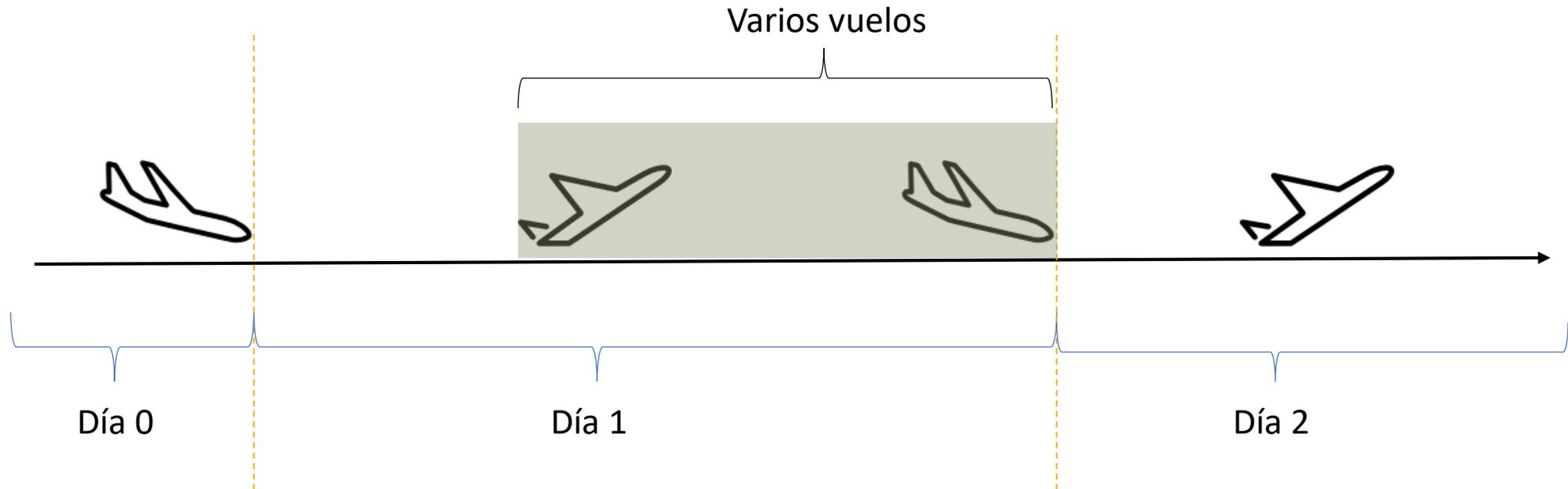
# El problema

Líneas de vuelo de un día (LOFs)



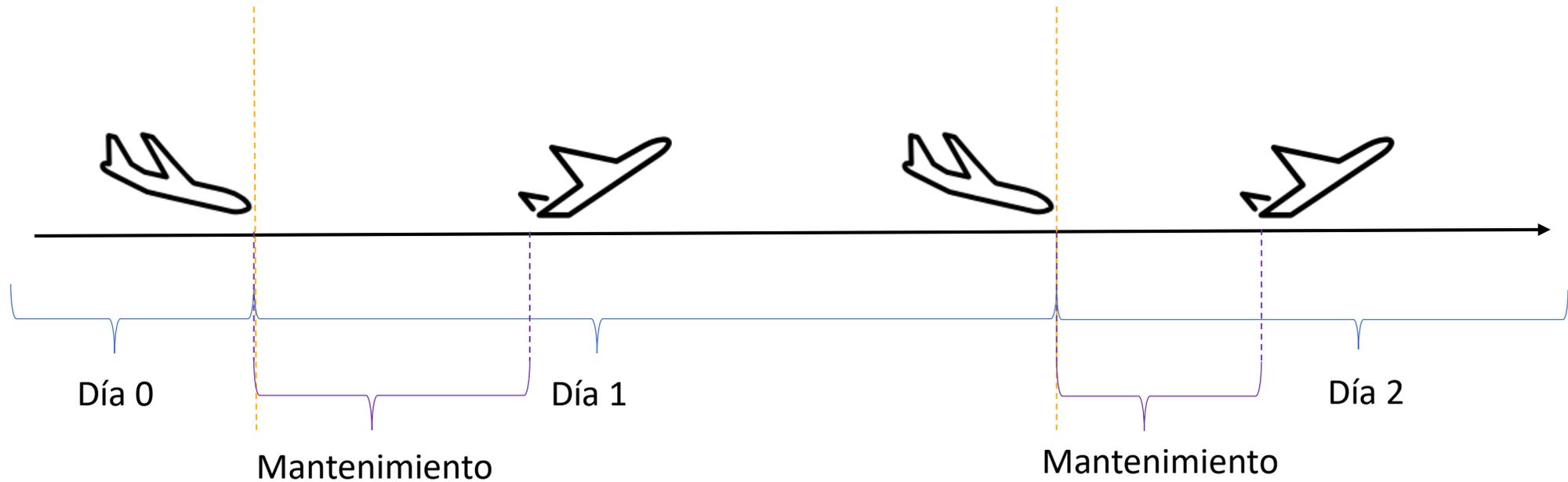
# El problema

Líneas de vuelo de un día (LOFs)



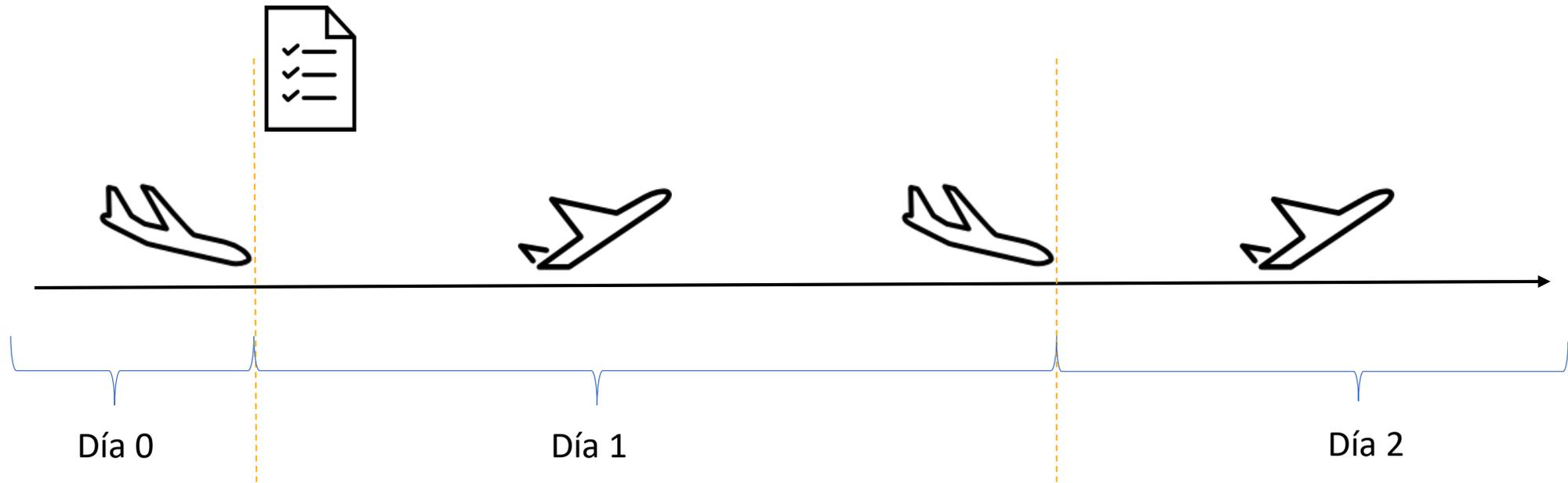
# El problema

Planificación



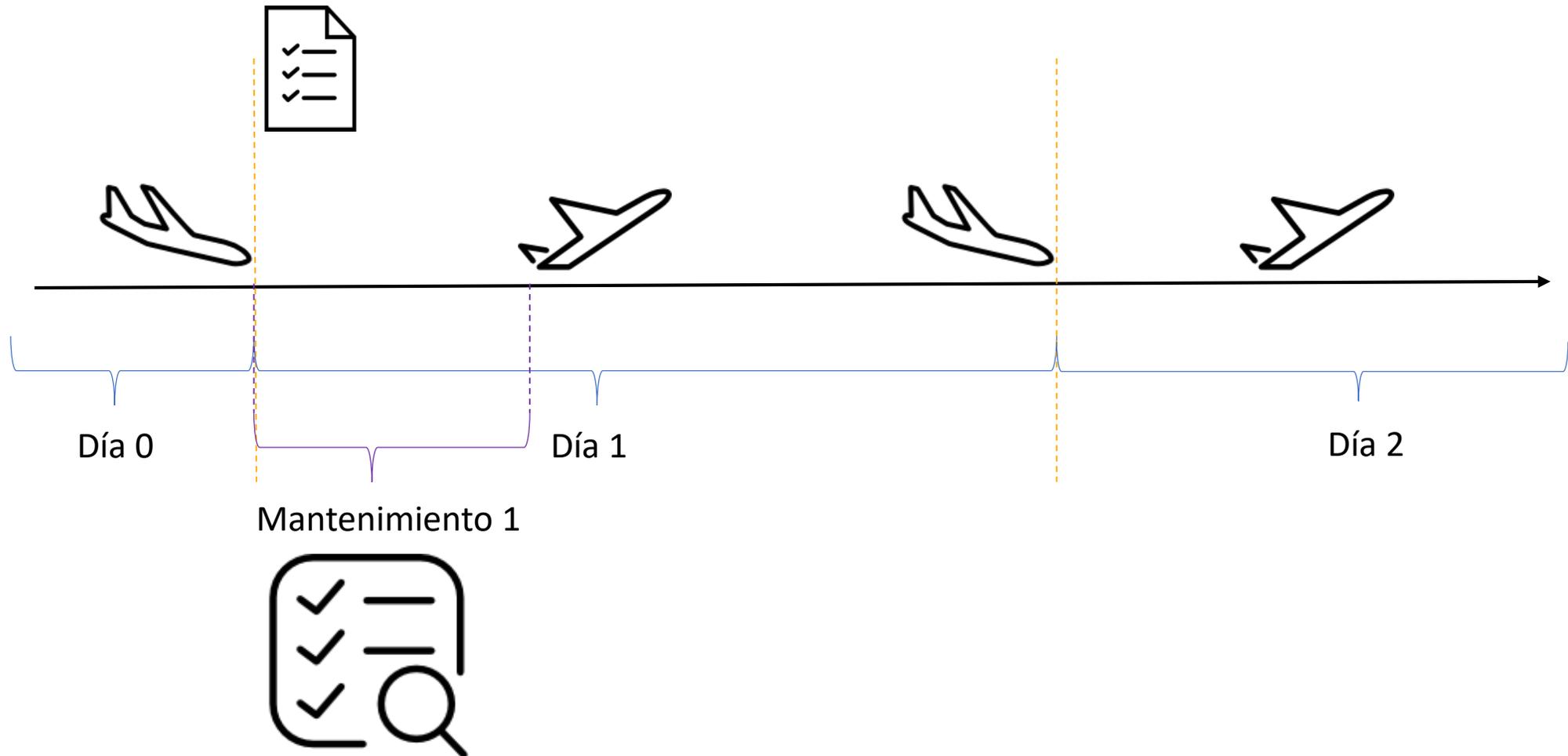
# El problema

Planificación



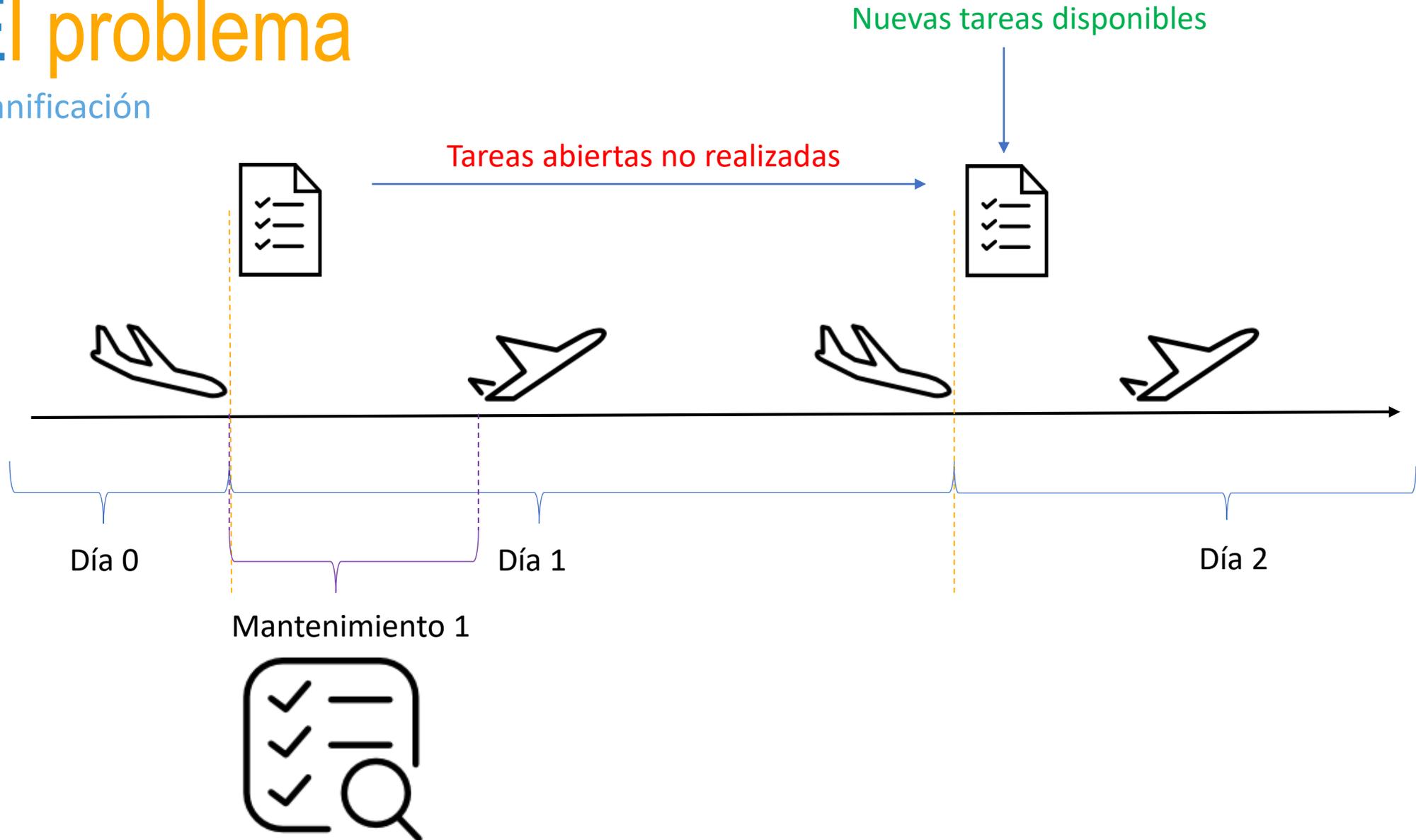
# El problema

Planificación



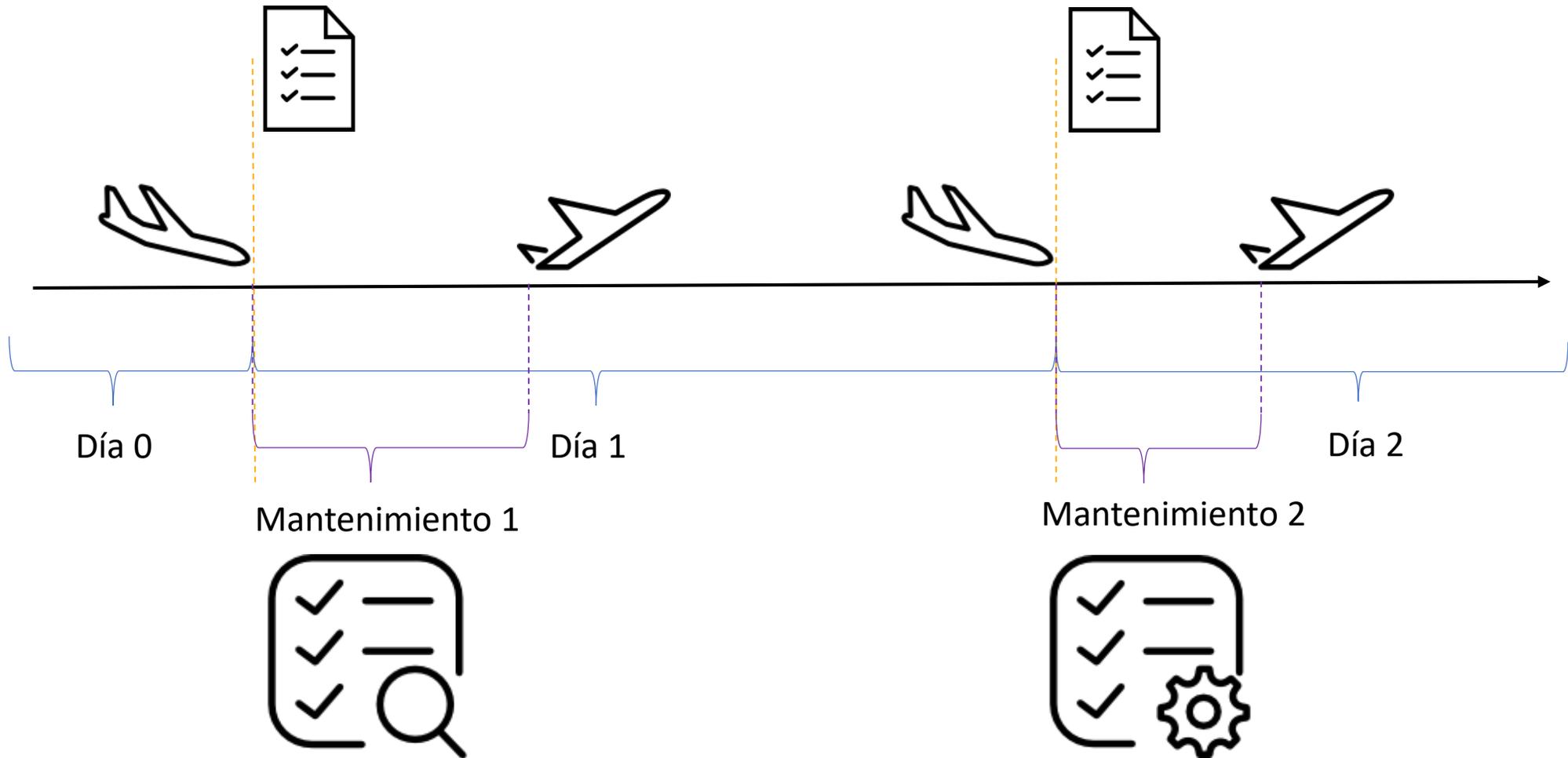
# El problema

Planificación



# El problema

Planificación



# El problema

Asignación de aviones a LOFs



Avión saludable



5 tareas pequeñas



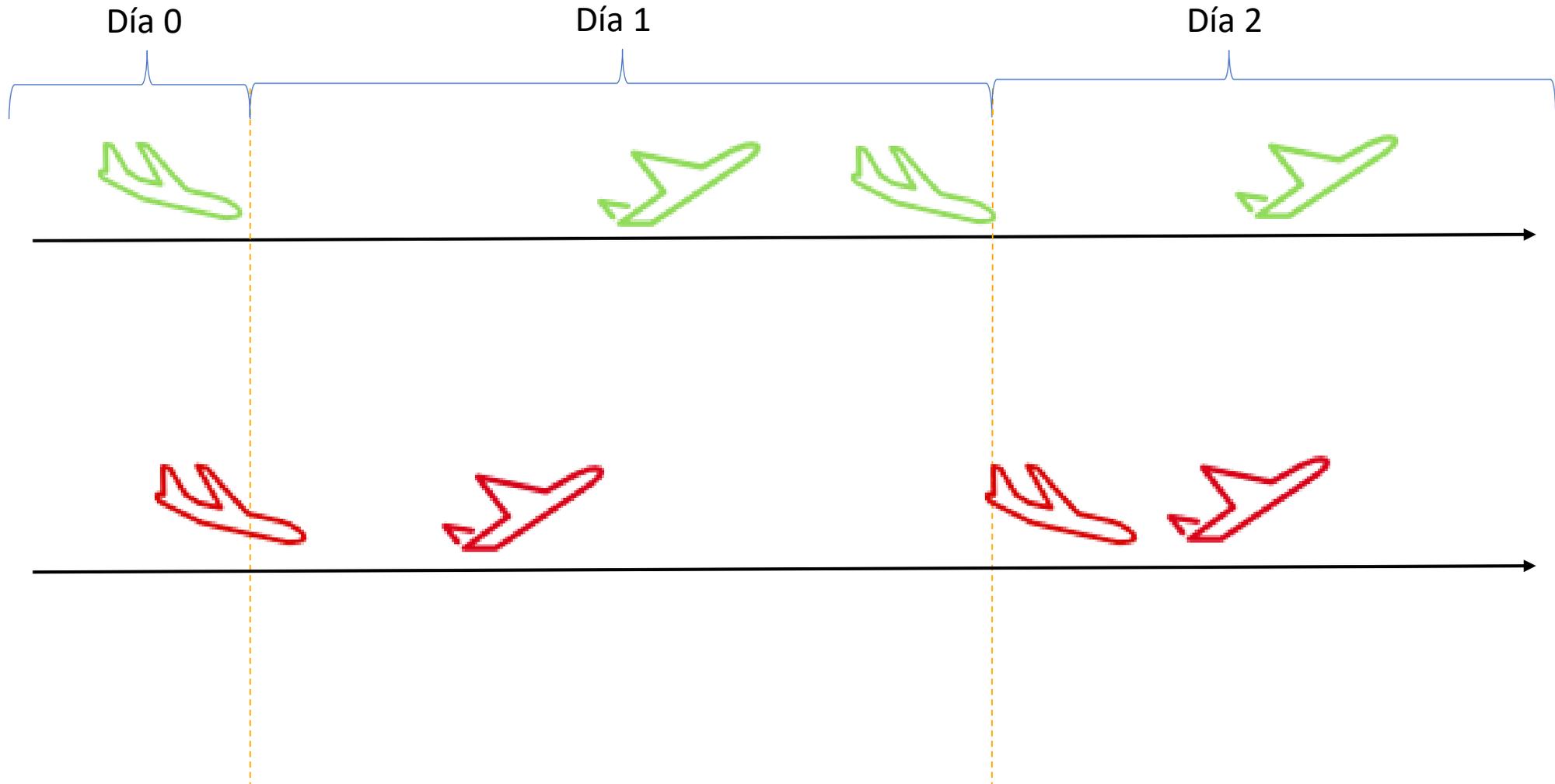
Avión enfermizo



10 tareas medianas

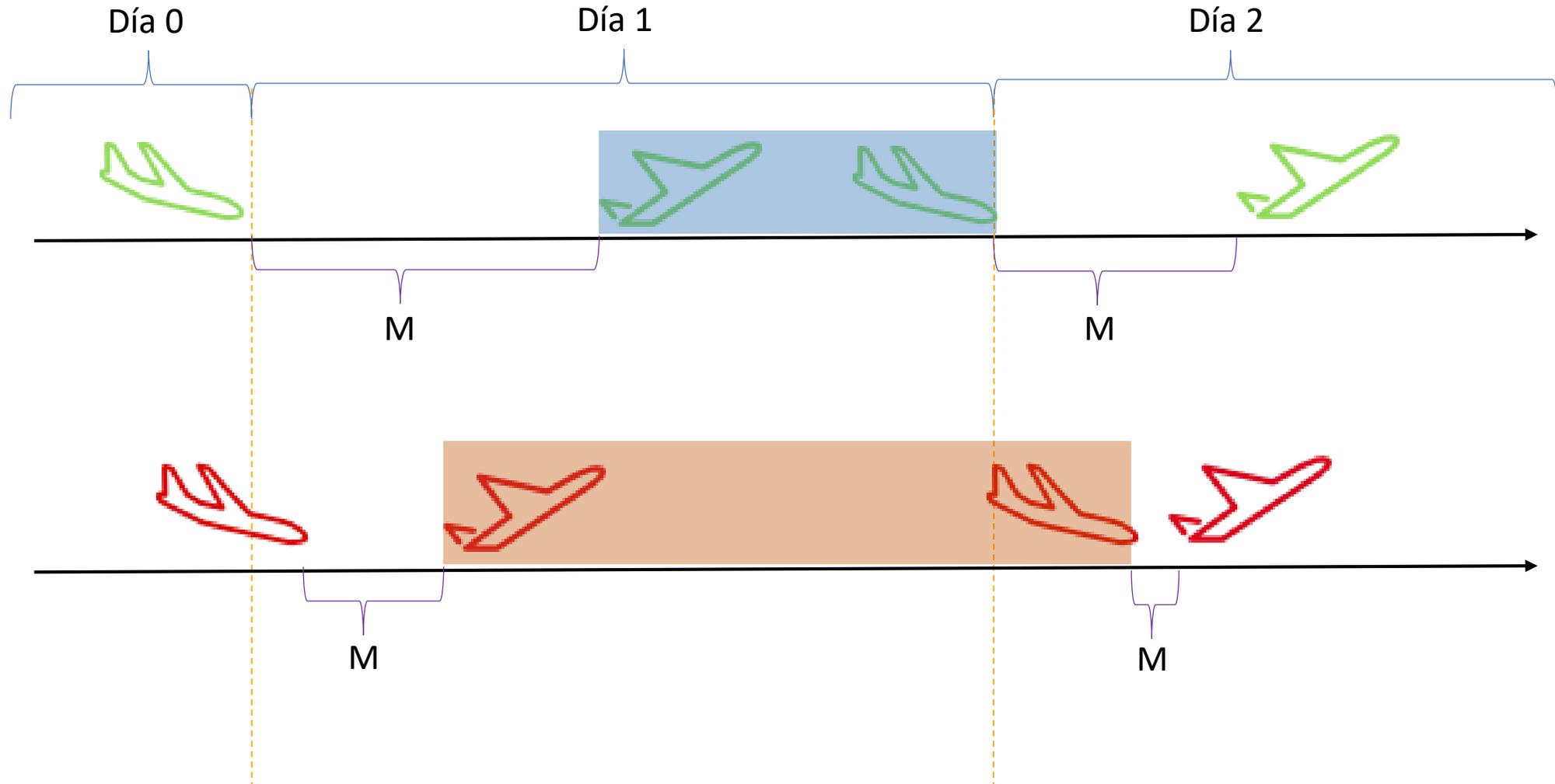
# El problema

Asignación de aviones a LOFs



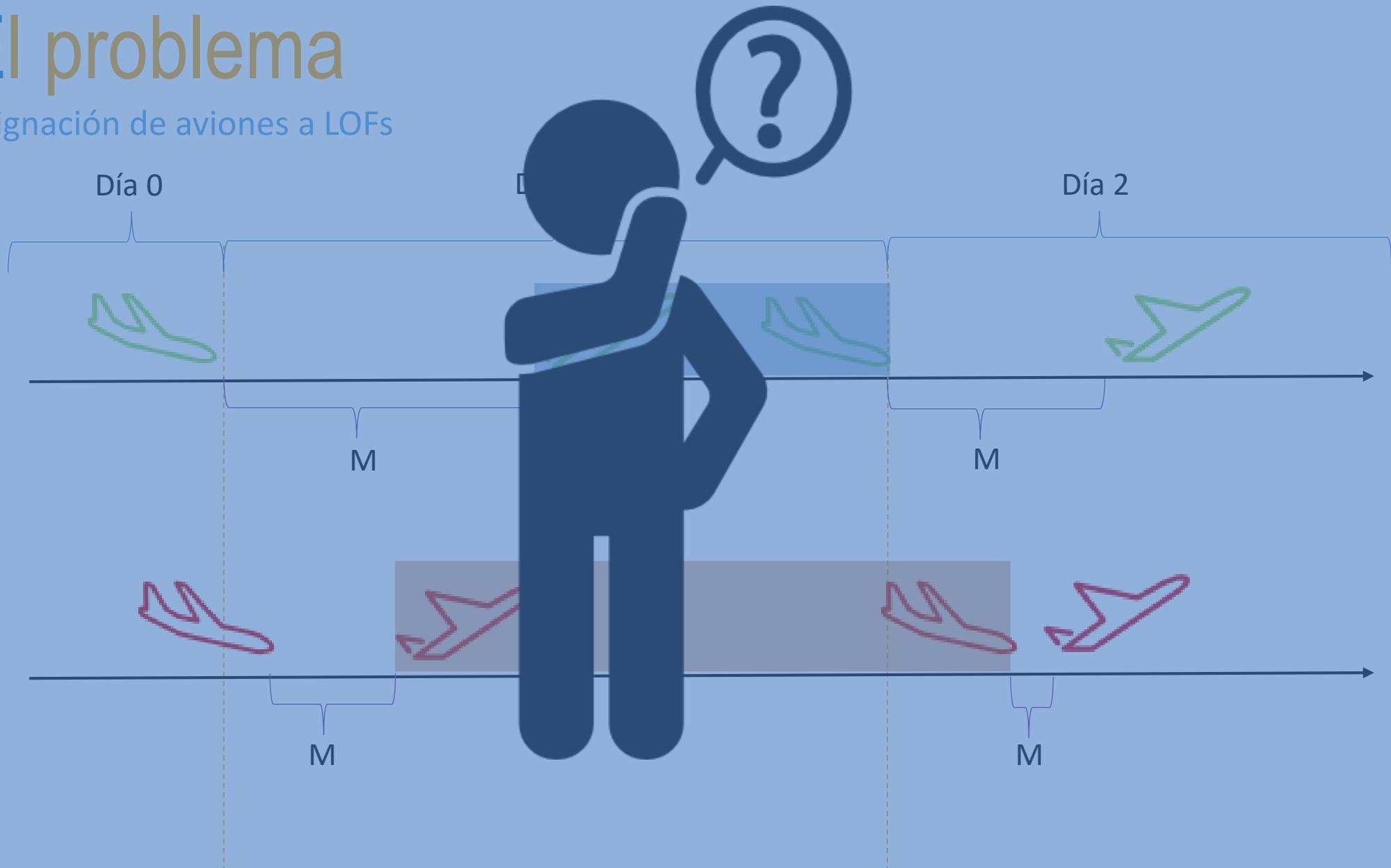
# El problema

Asignación de aviones a LOFs



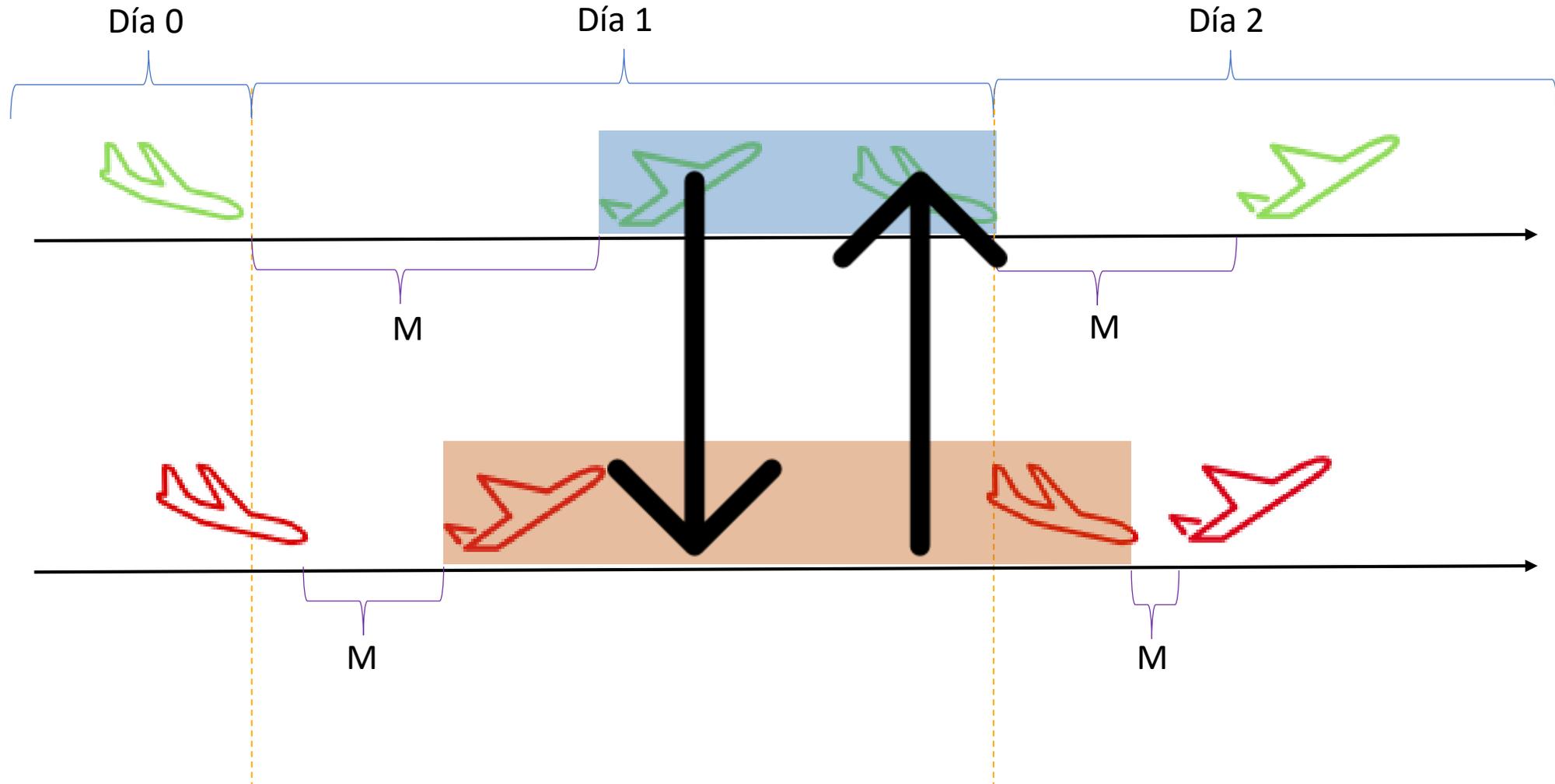
# El problema

Asignación de aviones a LOFs



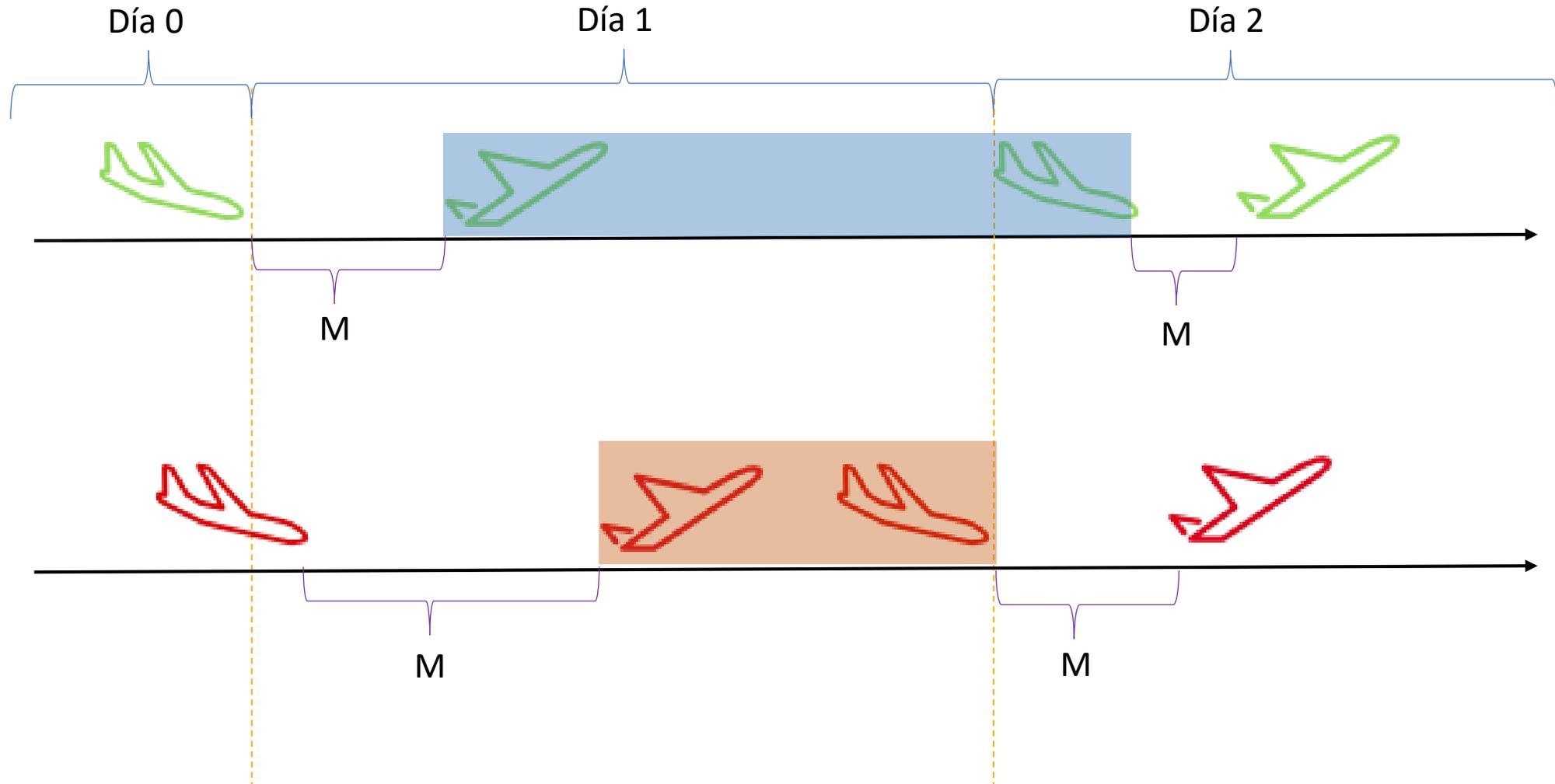
# El problema

Asignación de aviones a LOFs



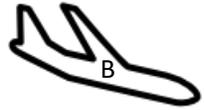
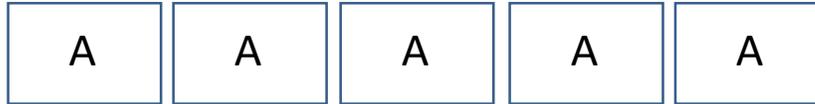
# El problema

Asignación de aviones a LOFs



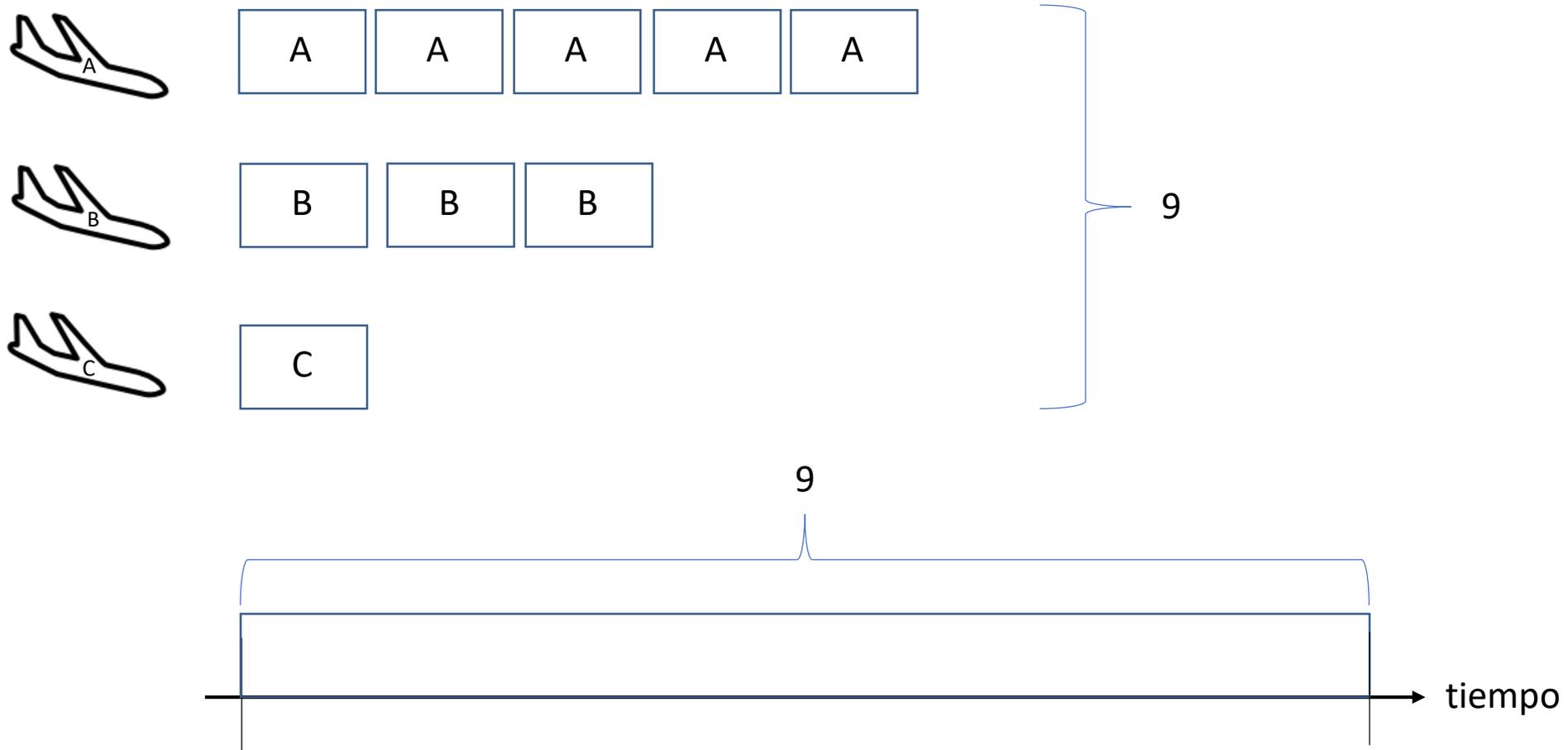
# El problema

Restricción de capacidad por hora



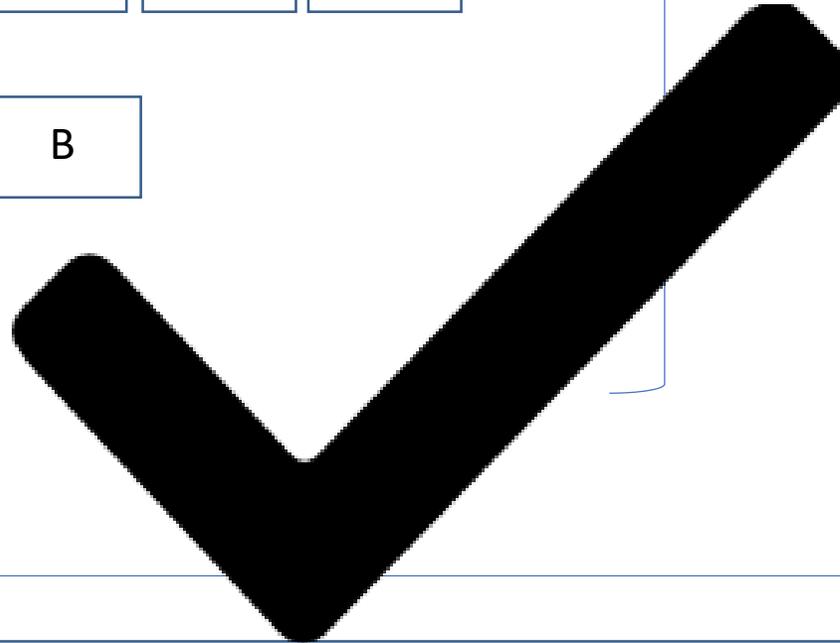
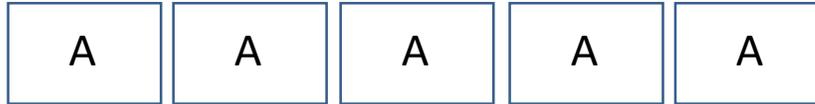
# El problema

Restricción de capacidad por hora



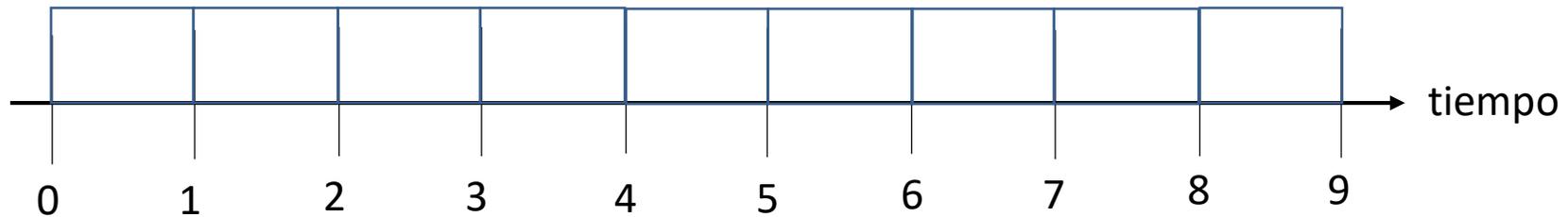
# El problema

Restricción de capacidad por hora



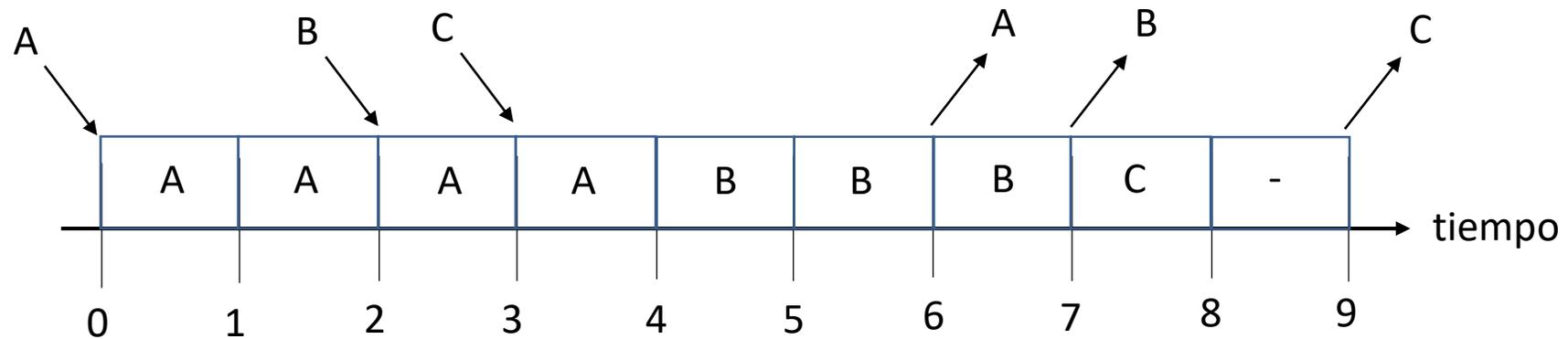
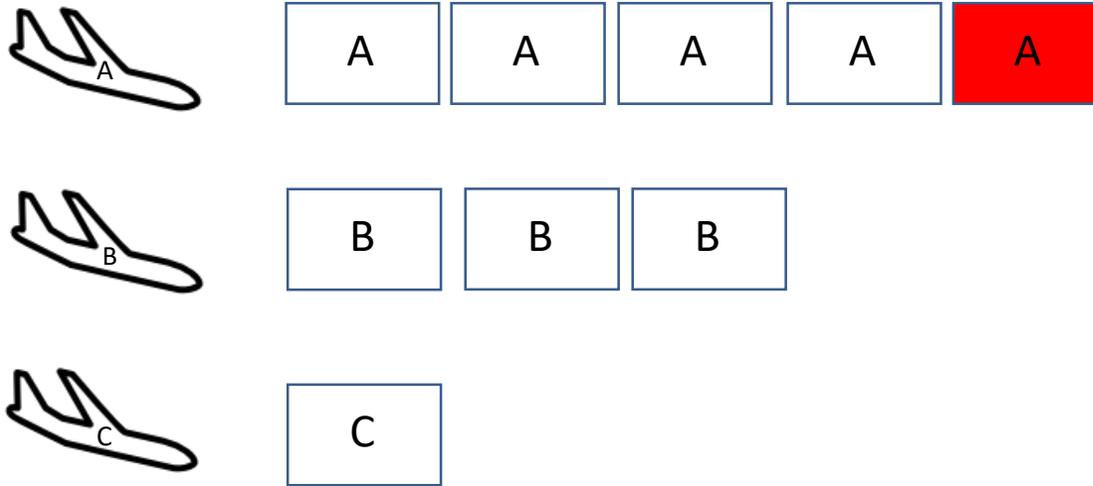
# El problema

Restricción de capacidad por hora



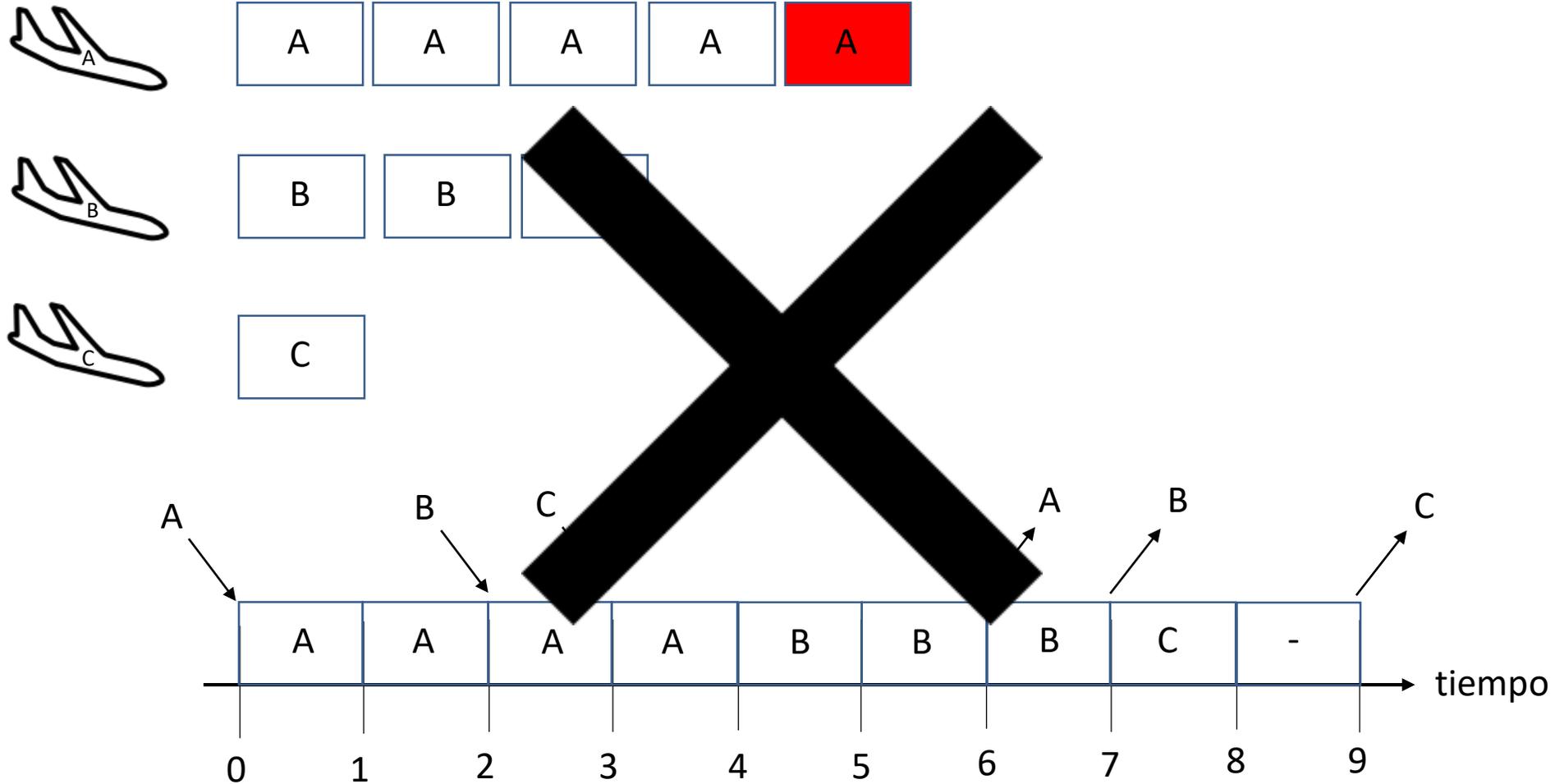
# El problema

Restricción de capacidad por hora



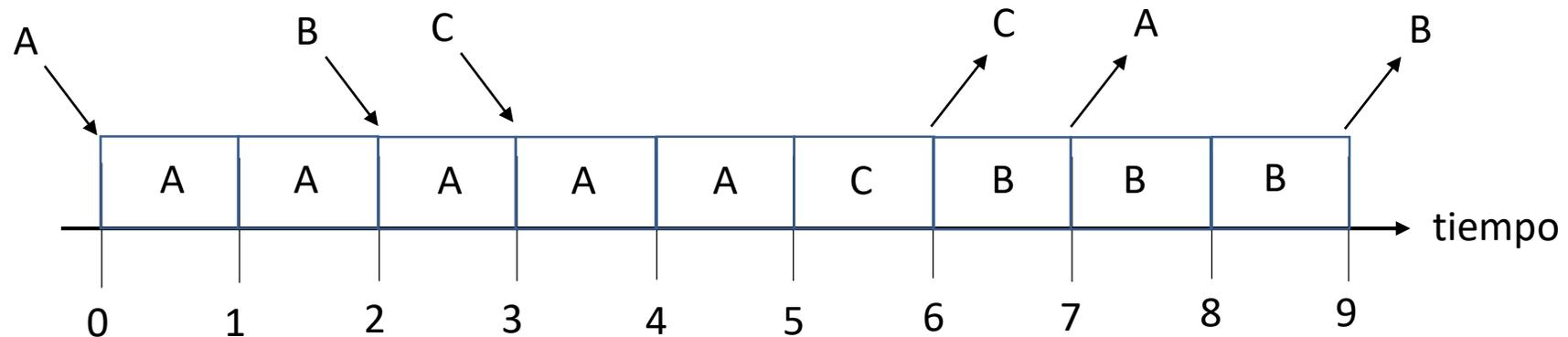
# El problema

Restricción de capacidad por hora



# El problema

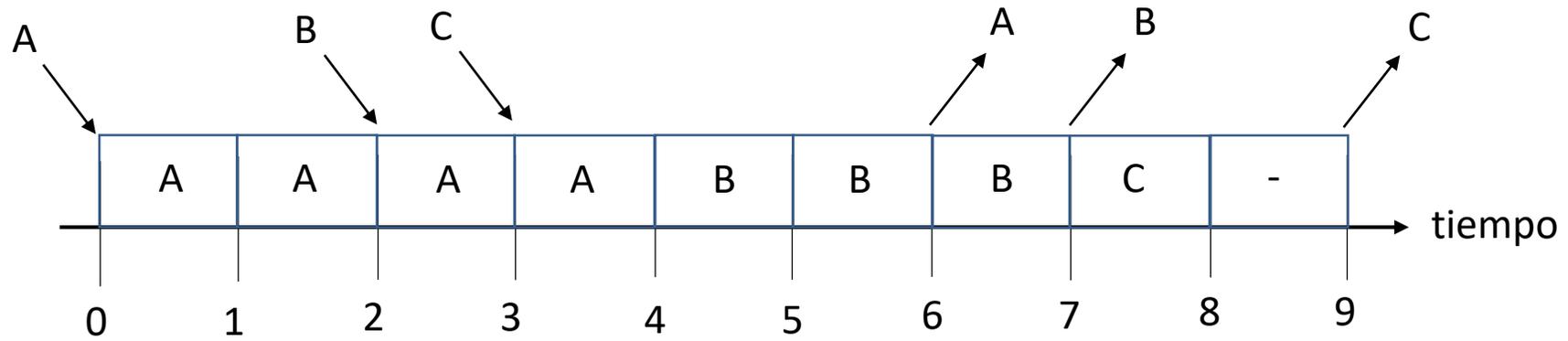
Restricción de capacidad por hora



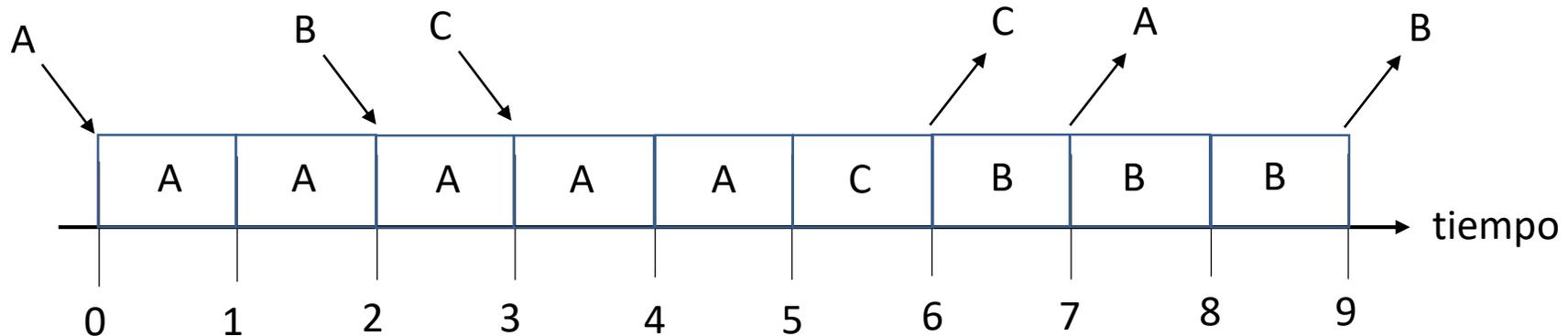
# El problema

Restricción de capacidad por hora

Antes



Después



## 2. Proceso de Decisión Markoviano

# Proceso de Decisión Markoviano

## MDP

- Etapas: Una por día  $t \in T$
- Estado en cada etapa:  $S_t = (m_t, O_t)$
- Decisiones:
  - LOF que cada avión operará el día  $t$
  - Qué aviones pasan por mantenimiento
  - Qué tareas de mantenimiento de las disponibles se realizan en ellos

$$X_t \in \mathbb{X}_t(S_t)$$

# Proceso de Decisión Markoviano

## MDP

- Espacio factible de acciones  $\mathbb{X}_t(S_t)$  en el estado  $S_t$ 
  - 1-2. Una LOF-avión o fuera de operación
  3. Tarea es realizada o no
  4. Tarea crítica vencida  $\rightarrow$  AOG
  5. Tarea planificada cuando avión está en mantenimiento
  6. Capacidad de la base
  7. Duración mínima de una tarea
  - 8-10. Restricciones de recursos por hora
  - 11-14. Construcción de bloques de mantenimiento a partir de LOFs
  - 15-19. Naturaleza de variables

# Proceso de Decisión Markoviano

MDP

- Costo decisión  $X_t$  en estado  $S_t$

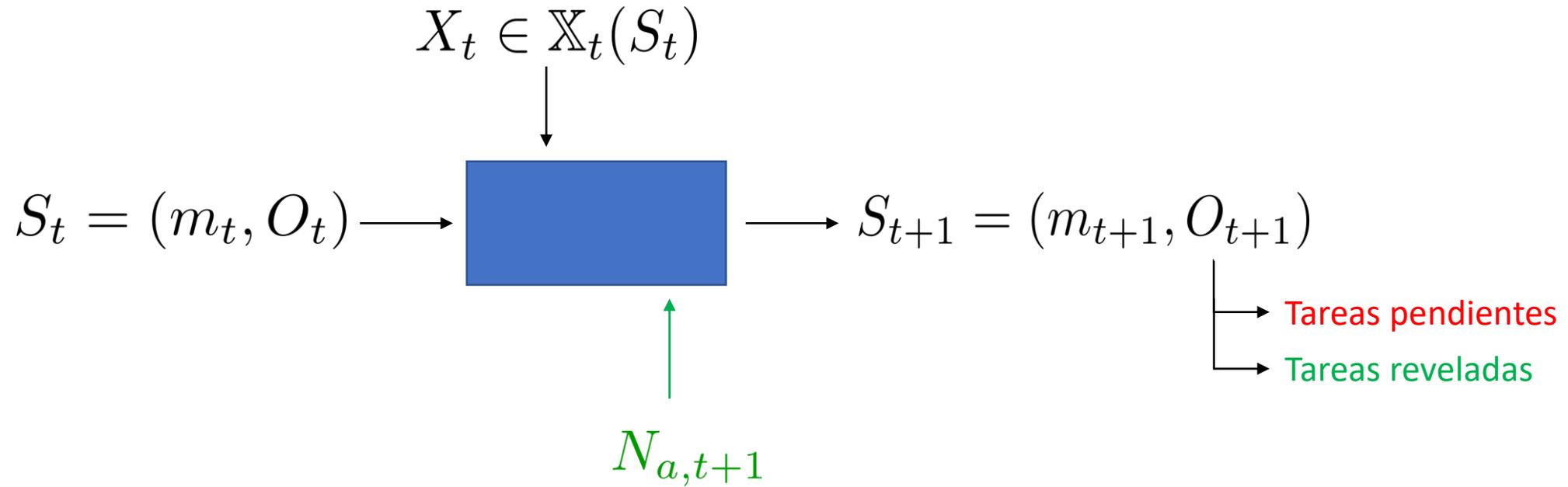
$$C(S_t, X_t) = \underbrace{\alpha \sum_{a \in A} u_{a,t}}_{\text{AOG}} + \underbrace{\sum_{k \in O_{a,t} : \gamma_k = 0} \delta_k \cdot q_k}_{\text{Externalización}}$$

$$\alpha \gg \delta$$

# Proceso de Decisión Markoviano

MDP

- Transición de estado



# Proceso de Decisión Markoviano

MDP

- Política óptima

$$V_t(S_t) = \min_{X_t \in \mathbb{X}_t(S_t)} \{ C(S_t, X_t) + \underbrace{\mathbb{E} [V_{t+1}(S_{t+1}) | S_t, X_t]}_{\text{cost-to-go}} \}$$

# Proceso de Decisión Markoviano

MDP

- Política óptima

$$V_t(S_t) = \min_{X_t \in \mathbb{X}_t(S_t)} \{ C(S_t, X_t) + \underbrace{\mathbb{E} [V_{t+1}(S_{t+1}) | S_t, X_t]}_{\text{cost-to-go}} \}$$

$$V_t(S_t) = \min_{X_t \in \mathbb{X}_t(S_t)} \{ C(S_t, X_t) + Q_t(S_t, X_t) \}$$

# 3. Modelo MIP determinístico

# Modelo MIP determinístico

## Decisiones del modelo

- ✓ Supone información perfecta de tareas futuras al comienzo del horizonte de planificación
- ✓ Decisión óptima se puede determinar al comienzo del horizonte
- ✓ *Perfect Information Relaxation - PIR* (Brown, Smith, y Sun, 2010)

# 4. Políticas o heurísticas

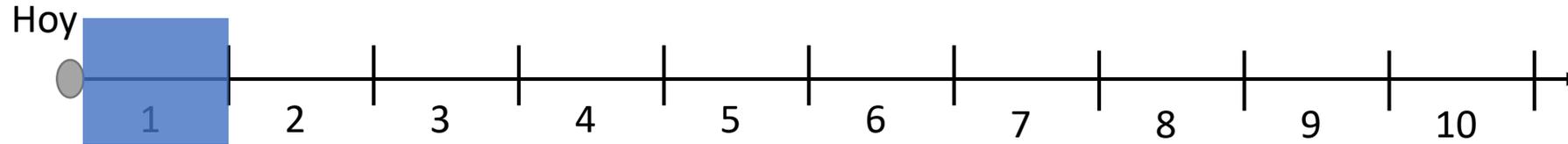
# Políticas o heurísticas

## Resumen

- Política 1: Miope
- Política 2a: VFA1
- Política 2b: VFA2
- Política 3: HR
- Política 4a: HR-VFA1
- Política 4b: HR-VFA2

# Políticas o heurísticas

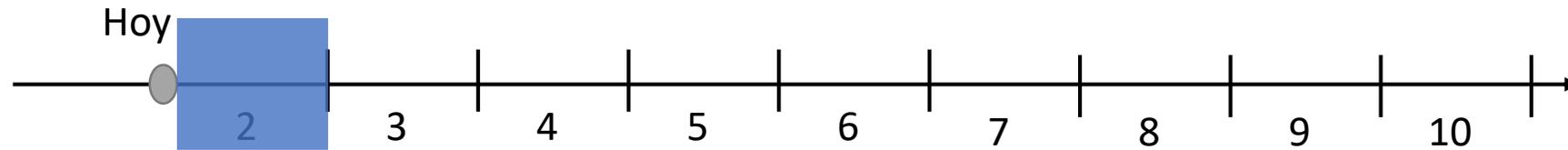
## Política 1: Miope



$$V_t(S_t) = \min_{X_t \in \mathbb{X}_t(S_t)} \{C(S_t, X_t)\}$$

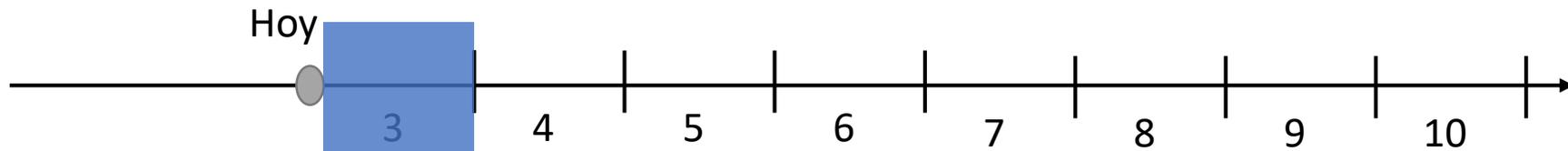
# Políticas o heurísticas

## Política 1: Miope



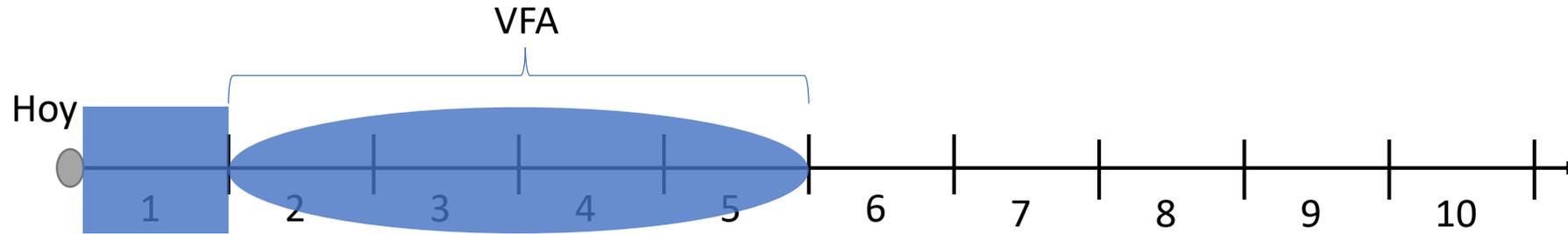
# Políticas o heurísticas

## Política 1: Miope



# Políticas o heurísticas

## Política 2: VFA



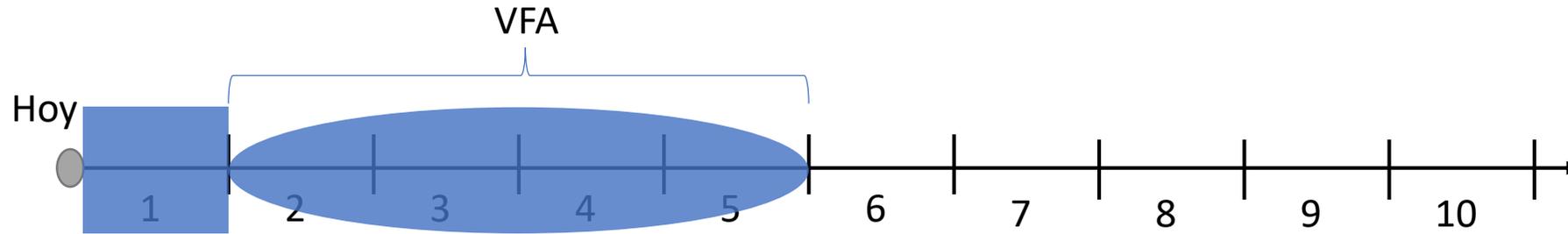
$$V_t(S_t) = \min_{X_t \in \mathbb{X}_t(S_t)} \{C(S_t, X_t) + Q_t^{VFA}(S_t, X_t)\}$$

$$Q_t^{VFA}(S_t, X_t) = \sum_{f \in F} \lambda_f \cdot \phi_f(S_t, X_t)$$

Carga de trabajo que se deja pendiente con vencimiento en cada uno de los próximos cuatro días

# Políticas o heurísticas

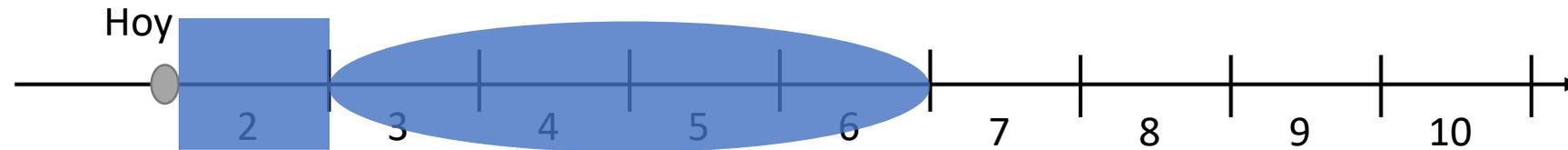
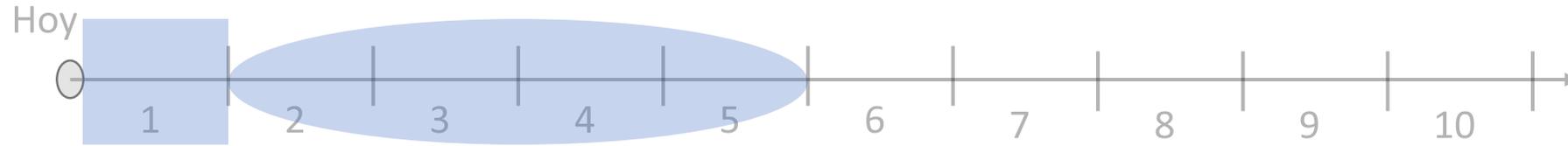
## Política 2: VFA



- Dos opciones para VFA:
  1. Valores criterio experto → Política 2a: VFA1
  2. Valores calibrados → Política 2b: VFA2

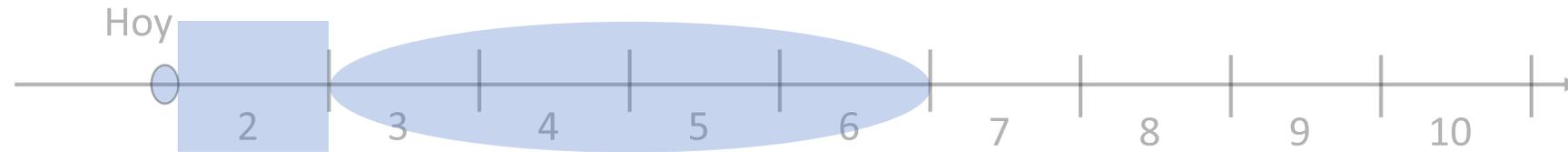
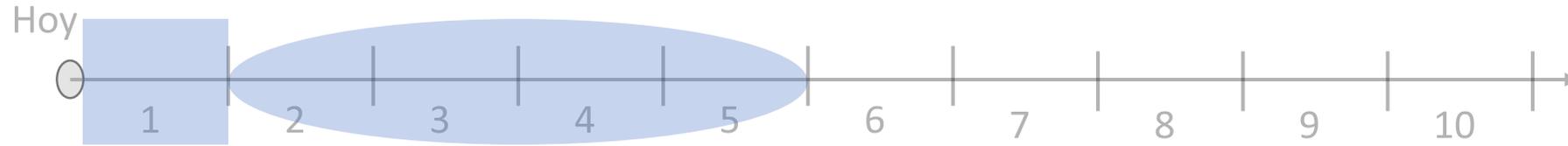
# Políticas o heurísticas

## Política 2: VFA



# Políticas o heurísticas

## Política 2: VFA



# Políticas o heurísticas

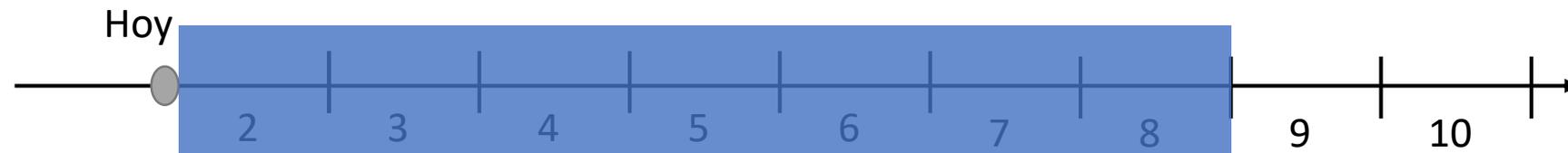
## Política 3: HR



$$V_t(S_t) = \min_{X_t \in \mathbb{X}_t(S_t)} \left\{ C(S_t, X_t) + \sum_{j=t+1}^{t+R} C(S_j, X_j) \right\}$$

# Políticas o heurísticas

## Política 3: HR



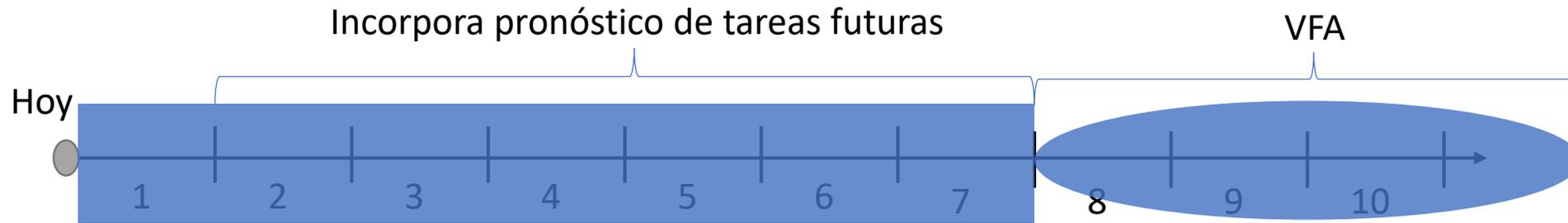
# Políticas o heurísticas

## Política 3: HR



# Políticas o heurísticas

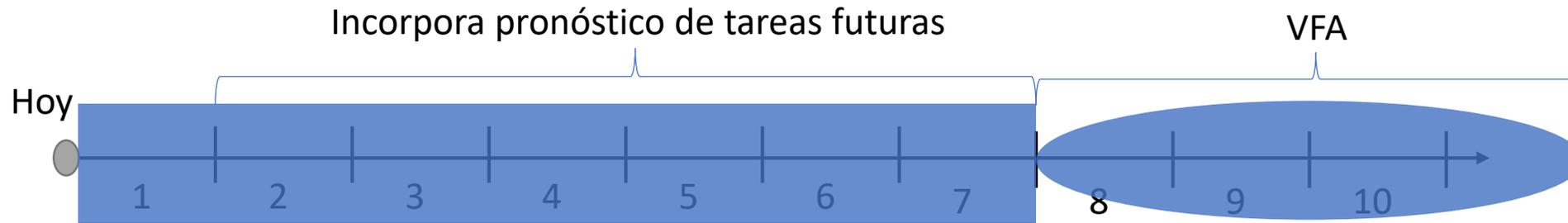
## Política 4: HR-VFA



$$V_t(S_t) = \min_{X_t \in \mathbb{X}_t(S_t)} \left\{ C(S_t, X_t) + \sum_{j=t+1}^{t+R} C(S_j, X_j) + Q_{t+R}^{VFA}(S_{t+R}, X_{t+R}) \right\}$$

# Políticas o heurísticas

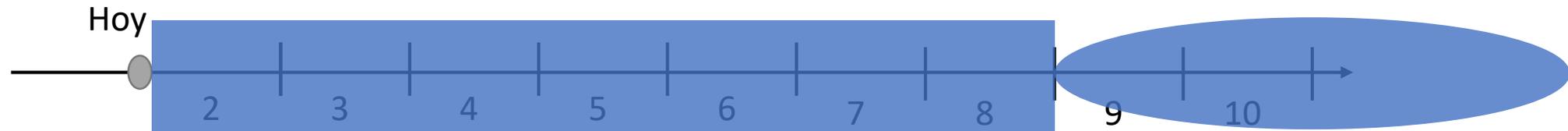
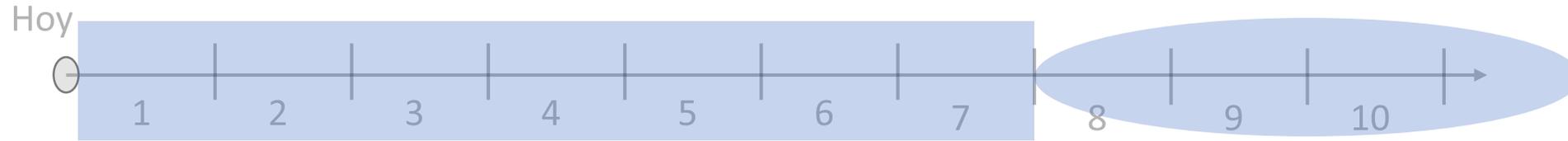
## Política 4: HR-VFA



- Dos opciones para VFA:
  1. Valores criterio experto → Política 3a: HR-VFA1
  2. Valores calibrados → Política 3b: HR-VFA2

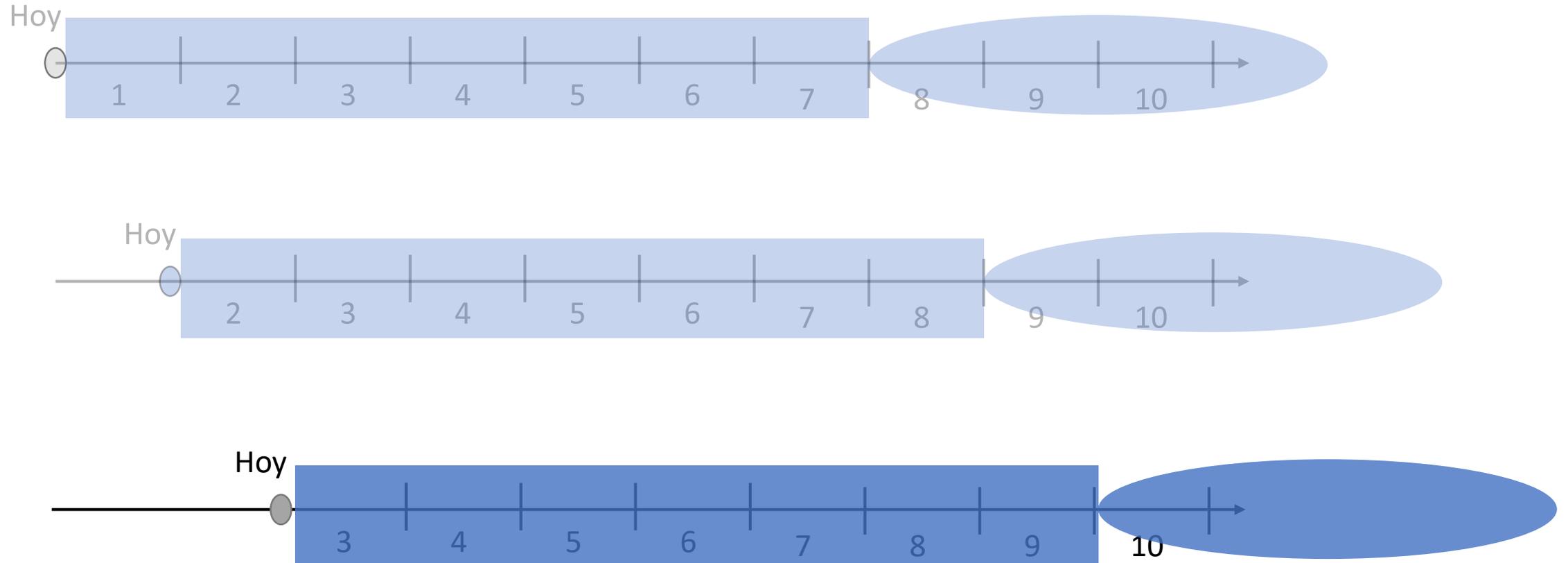
# Políticas o heurísticas

Política 4: HR-VFA



# Políticas o heurísticas

## Política 4: HR-VFA



# Políticas o heurísticas

## Resumen

- Política 1: Miope
- Política 2a: VFA1
- Política 2b: VFA2
- Política 3: HR
- Política 4a: HR-VFA1
- Política 4b: HR-VFA2

# Políticas o heurísticas

## Resumen

- Política 1: Miope
- Política 2a: VFA1
- Política 2b: VFA2
- Política 3: HR
- Política 4a: HR-VFA1
- Política 4b: HR-VFA2
  
- Política aerolínea
- Cota inferior: Información perfecta (PIM)

# 5. Caso de estudio

# Caso de estudio

## Descripción

Simulado a partir de información de operación doméstica de LATAM

- Aviones: 30
- Días: 30
- Recursos: 2 tipos
- Capacidad base: 20
- LOFs: Operación SCL
- Oferta: Necesaria para satisfacer demanda esperada ( $\rho = 1$ )
- Réplicas: 50
- Tiempo límite para resolver problema de cada día: 180 segundos

# 6. Resultados

# Resultados

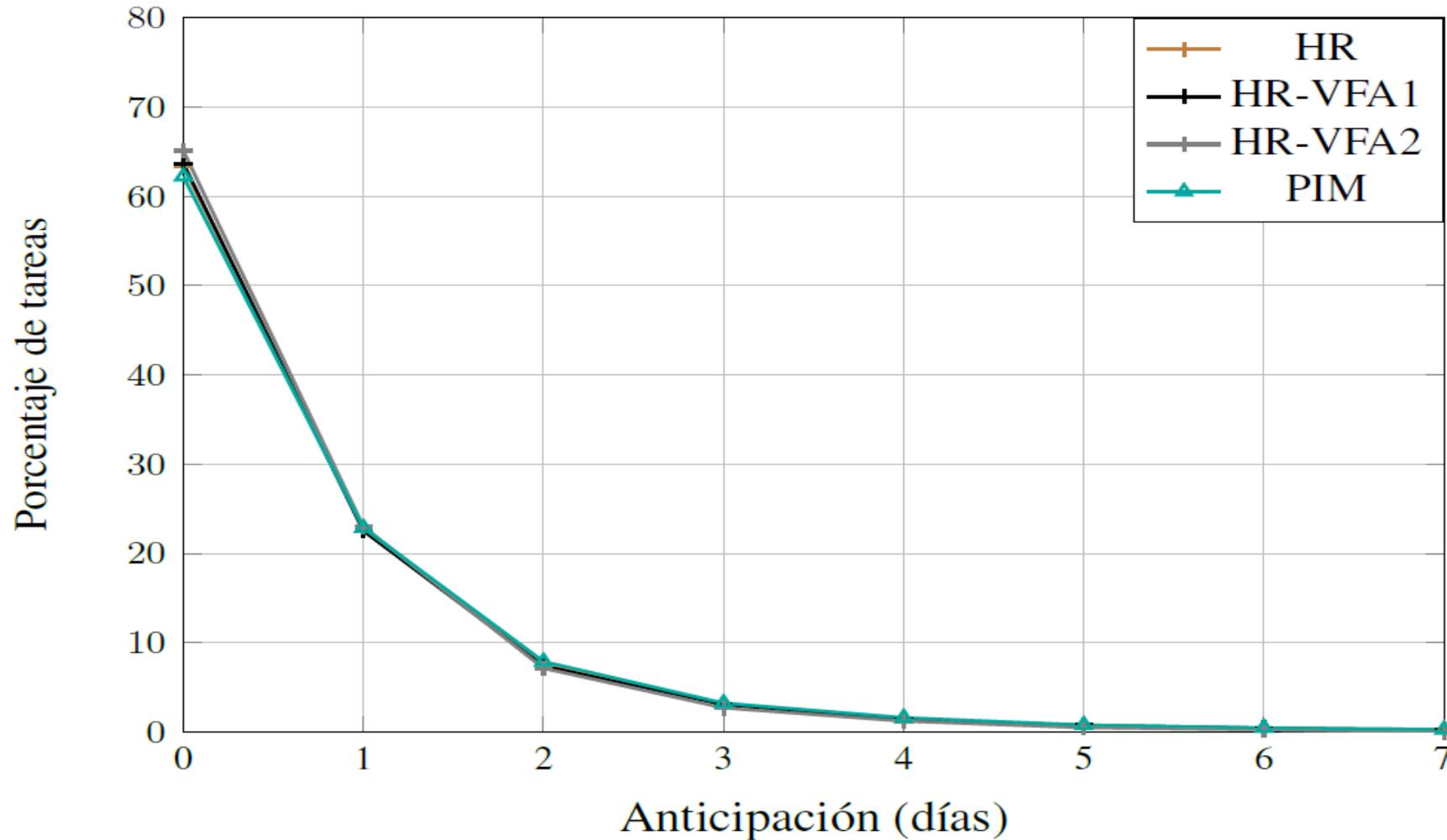
Caso base (50 réplicas)

Política	AOG	Externalizados (%)		gap (%)	Tiempo de cómputo por día (s)
		Tareas	Recursos		
Miope	12,16	20,97	19,44	3.147,00	0,12
Aerolínea	0,02	15,95	14,67	531,52	0,04
VFA1	1,74	4,16	3,67	389,39	0,61
VFA2	0	5,65	5,31	126,32	0,52
HR	0	2,57	2,52	6,66	50,47
HR-VFA1	0	2,44	2,43	2,64	121,66
HR-VFA2	0	2,43	2,45	3,71	116,14
PIM	0	2,33	2,33	0	-

- Política aerolínea externaliza un 83% más de carga de trabajo que política híbrida
- VFA2 evita AOG y reduce el *gap* a un tercio de VFA1, manteniendo tiempo de cómputo
- Políticas con HR alcanzan las mayores coberturas de tareas con valores sobre el 97% y combinadas con VFA obtienen resultados cercanos al PIM con *gaps* inferiores al 4%

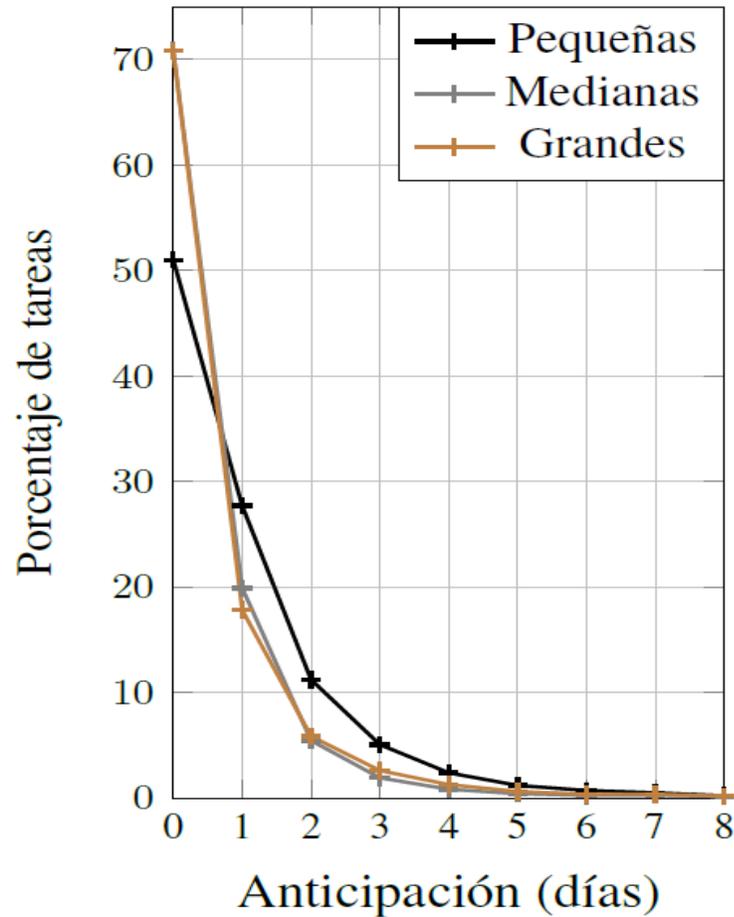
# Resultados

## Caso base - Anticipación

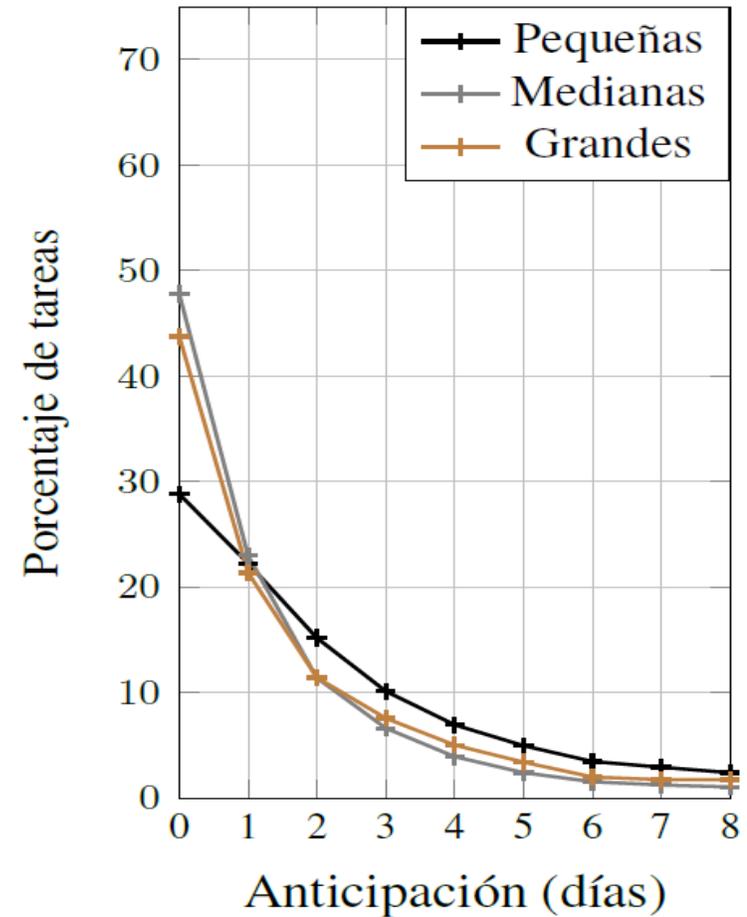


# Resultados

Caso 2: Diferentes niveles de saturación HR-VFA1 – Anticipación por tipo de tarea



(a) Saturación 100 %



(b) Saturación 90 %

# Resultados

## Caso 3: Planificación de mantenimiento sin integración con asignación de LOFs para HR-VFA1

Decisiones integradas	AOG	Externalizados	
		Tareas	Recursos
Sí	0	65,28	638,90
No	0,02	75,12	720,68

- Con un enfoque secuencial aumenta 15% las tareas no realizadas y 13% los recursos externalizados producto de ellas

# Resultados

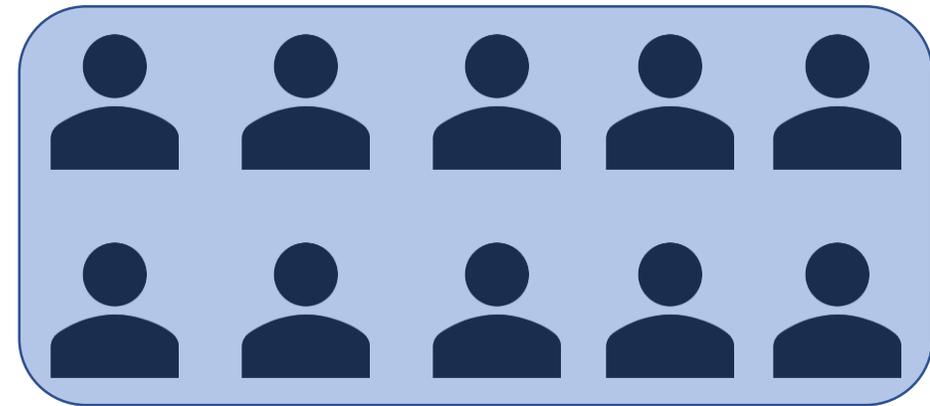
Caso 4: Planificación de mantenimiento descentralizada para HR-VFA1

TAP



Centralizado

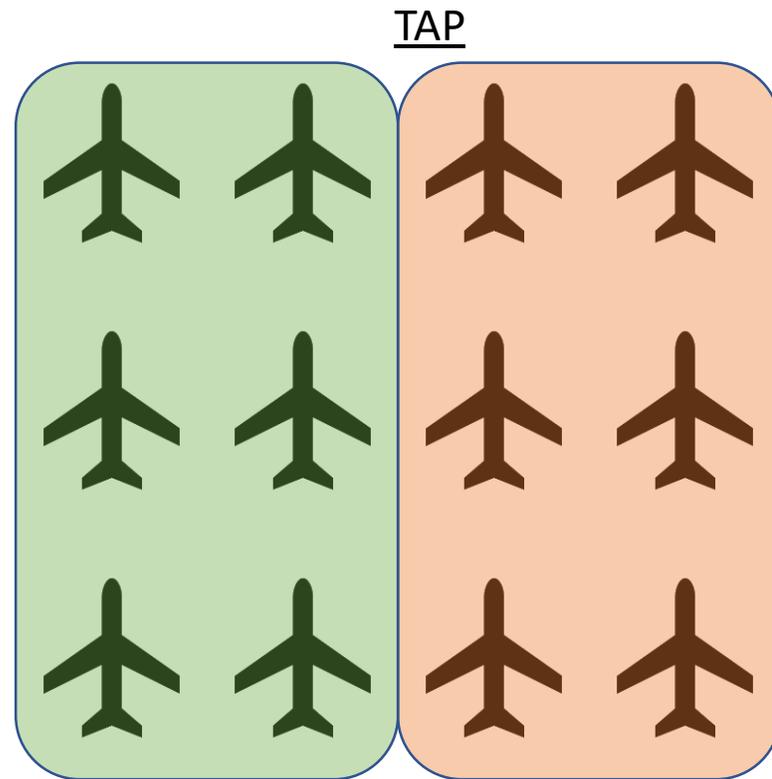
Recursos de mantenimiento



Centralizado

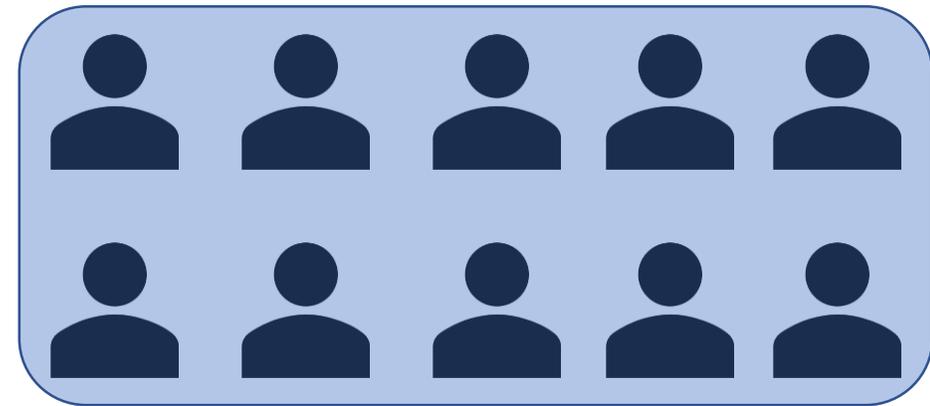
# Resultados

Caso 4: Planificación de mantenimiento descentralizada para HR-VFA1



Descentralizado

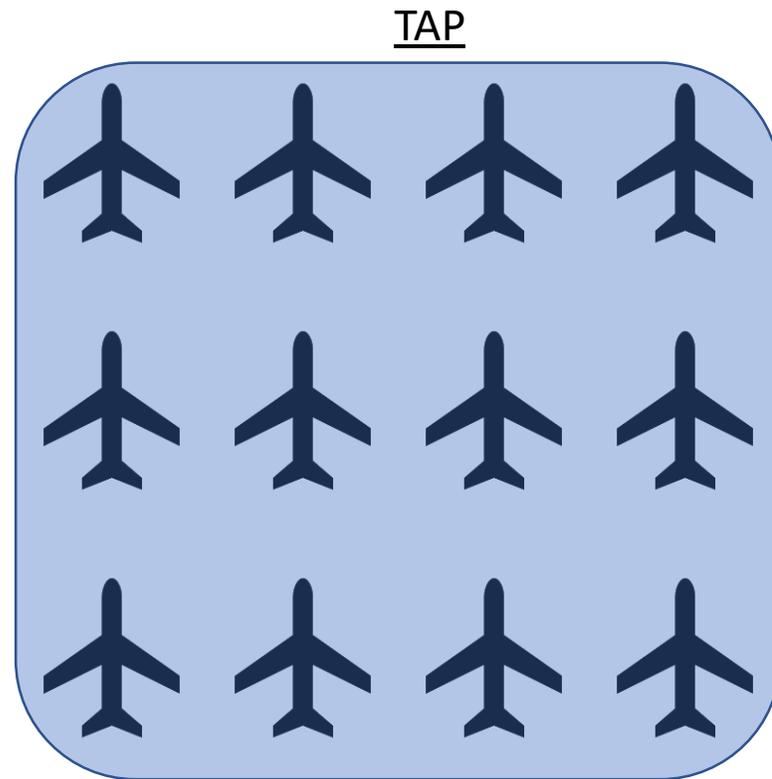
Recursos de mantenimiento



Centralizado

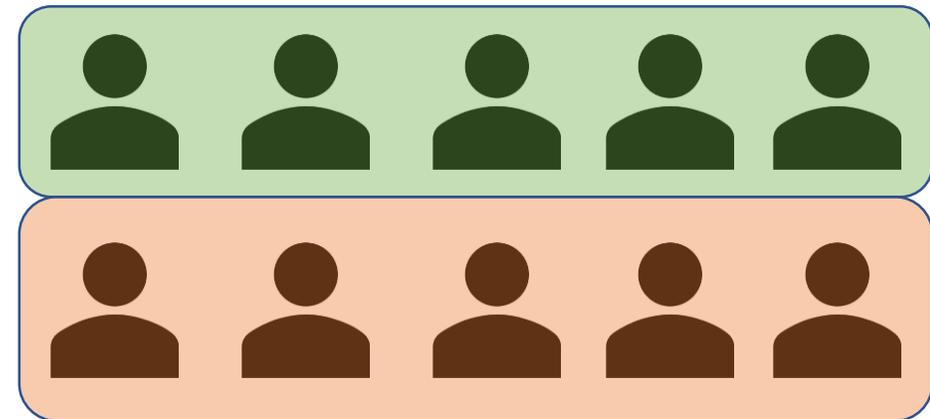
# Resultados

Caso 4: Planificación de mantenimiento descentralizada para HR-VFA1



Centralizado

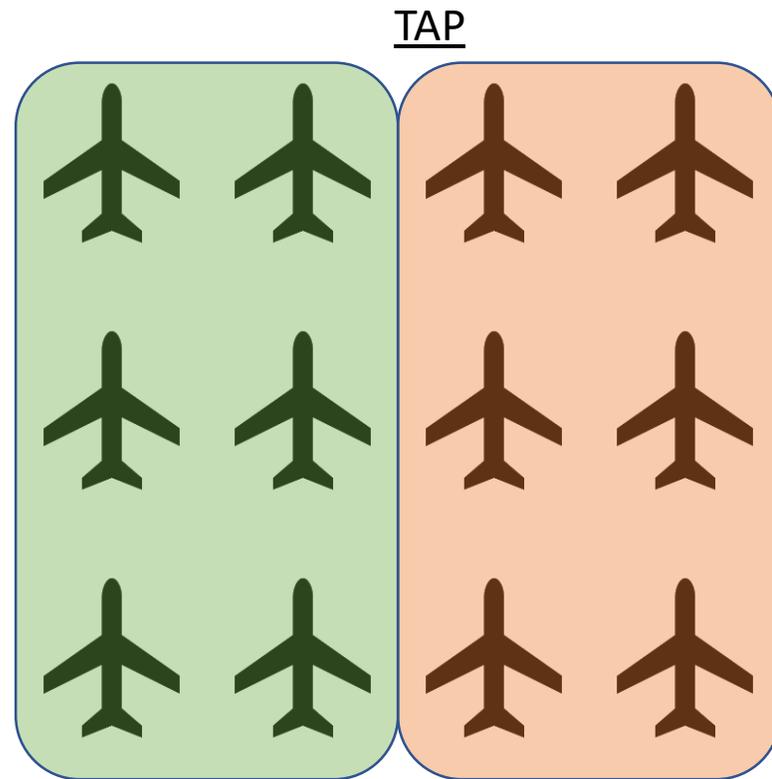
Recursos de mantenimiento



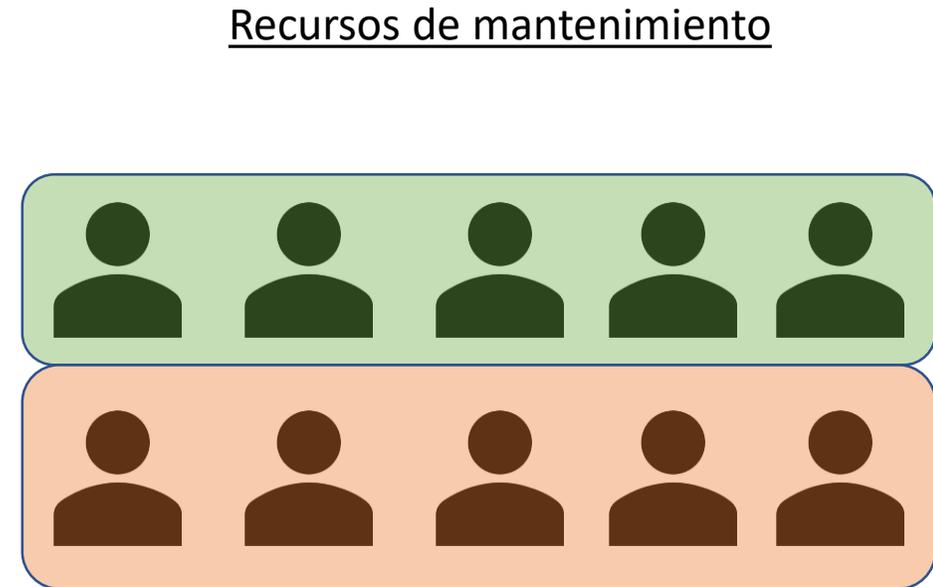
Descentralizado

# Resultados

Caso 4: Planificación de mantenimiento descentralizada para HR-VFA1



Descentralizado



Descentralizado

# Resultados

## Caso 5: Planificación de mantenimiento descentralizada para HR-VFA1

Descentralizado		AOG	Externalizados	
TAP	Recursos		Tareas	Recursos
No	No	0	65,28	638,90
Sí	No	0	63,16	638,36
No	Sí	0	115,46	1.110,60
Sí	Sí	0	180,60	1.743,34

- El sistema incurre en importantes costos cuando los recursos son descentralizados

# 7. Conclusiones

# Conclusiones

- Modelamos un proceso de decisión dinámico que incluye la llegada de tareas estocástico durante el horizonte de planificación.
- En nuestros experimentos el incorporar VFA permite obtener mejores resultados que la política de la aerolínea.
- La política de horizonte rodante es superior, empíricamente, a las políticas de VFA, y se sugiere combinar ambas políticas para aumentar en un 14% el nivel de servicio respecto a la política actual de la aerolínea

# Conclusiones

## Lecciones

- Un alto porcentaje de las tareas deben ser realizadas en su vencimiento
- Las tareas que deben ser utilizadas para anticipar trabajo deben ser pequeñas
- Es posible estimar el beneficio marginal de una unidad porcentual de recursos extra, en términos de externalización de trabajo
- Se comprobó la existencia de economías de escala en la planificación de mantenimiento por lo que se recomienda que las aerolíneas relativamente pequeñas compartan los recursos de mantenimiento



**CONICYT**  
Comisión Nacional de Investigación  
Científica y Tecnológica



Escuela de Ingeniería  
Departamento de Ingeniería de  
Transporte y Logística

# Gracias

Carlos Lagos Salgado (cblagos@uc.cl)  
**Felipe Delgado** (fdb@ing.puc.cl)  
Mathias Klapp (maklapp@ing.puc.cl)

CCIT19  
Santiago, Chile  
9 de octubre, 2019