
TP2 - Gestión eficiente de recursos en sistemas ferroviarios

Motivación

En un contexto global donde el cambio climático aparece como uno de los principales desafíos en el mediano plazo, el desarrollo y la gestión eficiente de medios de transporte sustentables adquiere una relevancia significativa de cara a fomentar la adopción de los mismos por parte de los usuarios. Los sistemas ferroviarios, conocidos por su menor huella ambiental en comparación con los modos de transporte basados en combustibles fósiles, representan una alternativa fundamental para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero y promover la movilidad sostenible.

La planificación en sistemas ferroviarios es una tarea crítica para que su funcionamiento sea correcto, seguro y eficiente. Un sistema que ofrezca seguridad, puntualidad y un nivel de servicio de alta calidad es fundamental para atraer nuevos pasajeros y retener a los que ya son usuarios del mismo. En líneas generales, dada la infraestructura disponible (estaciones, cantidad de vías entre estaciones, cantidad de pasajeros a transportar) la *planificación (táctica)* de un sistema ferroviario incluye las siguientes etapas:

- *Definición del cronograma (timetable)*: decidir qué servicios ofrecer, incluyendo sus horarios. Esto implica indicar horarios de partida y arribo de cada servicio en cada una de las estaciones de su recorrido. Un ejemplo clásico corresponde a un cronograma de horarios que se repite todos los días de la semana (ver, por ejemplo, el [Retiro-Tigre](#) de la Línea Mitre).
- *Circulación de material rodante (rolling stock)*: Dados los servicios planificados y sabiendo cuántos pasajeros (demanda) debe trasladar cada uno de ellos, determinar cuántas unidades de material rodante (vagones) son necesarios, y cómo deben utilizarse los mismos a lo largo del día.
- *Asignación de tripulaciones (crew)*: Sabiendo cuáles son los servicios que se deben ejecutar y cuál es la asignación de material rodante, asignar conductores, ingenieros y demás personal cumpliendo restricciones de seguridad y condiciones laborales (jornada, descanso, etc.)

Estas tres etapas se encuentran interrelacionadas, e idealmente deberían ser abordadas de forma conjunta. Por ejemplo, la factibilidad de asignar tripulaciones depende de los servicios planificados y del material rodante asignado. Sin embargo, la escala de resolver este problema integrando todas estas etapas excede en general las posibilidades de los algoritmos actuales, y por lo tanto estas etapas se suelen abordar de manera individual y secuencial, buscando obtener una solución completa para el problema en etapas.

El problema

Somos miembros fundadores de la startup *Lovejoy Railways Services LLC*, enfocada en resolver problemas diversos en la industria ferroviaria usando algoritmos avanzados. Nos ha contratado



Figure 1: Laboratorio de experimentos de LRS LLC.

una empresa que busca mejorar su proceso para abordar la segunda etapa: la *Circulación de Material Rodante*. Usando nuestro innovador laboratorio para experimentos (Figura 1), el objetivo es el siguiente. Tomando como input

- el cronograma de servicios entre dos estaciones *cabeceras*, que se ejecuta exactamente igual todos los días;
- la demanda (medida en cantidad de pasajeros) para cada servicio;
- la capacidad de cada vagón (medida en cantidad de pasajeros), asumiendo que todos los vagones disponibles serán del mismo tipo (flota homogénea);

se busca determinar la mínima cantidad de vagones necesarios para que cada servicio pueda abastecer su demanda. Optimizar la utilización de este recurso es extremadamente relevante, ya que la adquisición de material rodante demanda fuertes inversiones y una utilización eficiente mejora la robustez del sistema.

A modo de ejemplo, consideremos el siguiente cronograma con 4 servicios: dos que van de Retiro hacia Tigre, y dos que van de Tigre hacia Retiro.¹

service id	hora	origen	tipo	hora	destino	tipo	demanda	
1	289	Retiro	D	343	Tigre	A	500	→ mins desde 00:00ms
2	304	Retiro	D	358	Tigre	A	500	→ departure / arrival
3	245	Tigre	D	299	Retiro	A	500	
4	260	Tigre	D	314	Retiro	A	500	→ cantidad de pasajeros

→ 5 vagones (100 pas. c/v)

Llamamos *evento* a una partida o llegada de un tren a una estación. En esta tabla, *hora* indica el momento en que ocurre un evento, medido en cantidad de minutos desde las 00:00 h. Además, *tipo* indica el tipo de evento (D = *departure*, A = *arrival*). La demanda de cada servicio está medida en cantidad de pasajeros. Supongamos adicionalmente que cada unidad de material rodante (vagón) tiene capacidad para 100 pasajeros. Luego, en este ejemplo, cada uno de los servicios requiere (al menos) 5 unidades para poder satisfacer la demanda. Una solución trivial (aunque quizás no muy eficiente) puede ser la siguiente. Asumimos que el día inicia el día con 10 unidades en cada estación, resultado de la ejecución del día anterior que permanecieron ahí durante la noche. Cada servicio toma sus 5 unidades *propias* del stock

¹Los horarios fueron alterados respecto al cronograma real para el ejemplo.

inicial, ejecuta el servicio, y termina en la otra cabecera. En total, se utilizan 20 unidades únicas. Notar que las condiciones al final del día son las mismas asumidas al principio.

Sin embargo, podemos notar que es posible ejecutar el crongorama siguiendo las condiciones mencionadas usando menos unidades. Notar que el tren 3 arriba a Retiro en el instante 299, antes de la partida desde Retiro del tren 2 en el instante 304. Luego, es posible que las unidades del tren 3 sean re-utilizadas por las del tren 2. Si se inicia el día con 5 unidades en Retiro y 10 unidades en Tigre, podemos plantear la siguiente solución:

- el tren 1 toma sus 5 unidades del stock inicial en Retiro;
- el tren 3 toma sus 5 unidades del stock inicial en Tigre;
- el tren 3 **traspasa** sus 5 unidades al tren 2 en Retiro;
- el tren 4 toma sus 5 unidades del stock inicial en Tigre (dado que su partida es anterior a la llegada del tren 2).

Al finalizar el día, ambas estaciones cuentan con la misma cantidad de unidades que al inicio, pudiendo repetir la misma asignación. A su vez, al transferir unidades entre servicios es posible reducir la cantidad total de unidades usadas en 5 unidades respecto de la solución anterior, requiriendo un total de 15 unidades para la ejecución del cronograma.

La decisión a tomar consiste en determinar cuántas unidades asignar a cada servicio, y cómo realizar los trasposos entre los mismos, minimizando la cantidad de unidades totales. A este problema se lo conoce como *circulación de material rodante*, y en una de sus formulaciones clásicas se guía de acuerdo a las siguientes reglas:

- Todos los servicios utilizan el mismo tipo de unidad, y éste es único.
- Un servicio puede traspasar unidades a uno o más servicios **posteriores**, no necesariamente inmediatos, que ocurren en la misma estación.
- Los trasposos entre servicios pueden ser parciales.
- Las unidades no utilizadas en una estación se guardan temporalmente en el *patio de maniobras*. Inicialmente, asumimos que el mismo tiene capacidad infinita.
- La cantidad de unidades asignadas a un servicio debe satisfacer la demanda. Es posible enviar unidades de más para su reubicación.
- Para incorporar restricciones de infraestructura, los servicios tienen también una limitación respecto al máximo de unidades que pueden circular.
- En el contexto de la empresa, las unidades sólo pueden traspasarse en las estaciones cabecera.

Según nuestro relevamiento, la empresa actualmente toma estas decisiones usando el siguiente método:

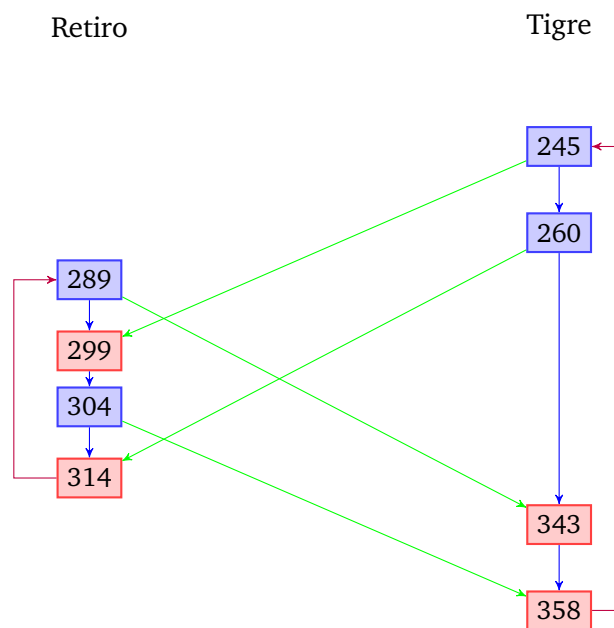
1. Se recorren los eventos en orden creciente de tiempo, manteniendo dos contadores por cada estación: cantidad de unidades *nuevas*, y *stock* de unidades resultante de servicios que arriban desde la otra cabecera. Inicialmente, ambos valores inician en 0.

2. Los servicios siempre viajan con la mínima cantidad de unidades necesarias para cumplir la demanda.
3. Ante un arribo de un servicio de una estación, se incrementa el stock con esas unidades.
4. Ante una partida de un servicio de una estación, se trata de cubrir la demanda con el stock disponible. Si este es insuficiente, el remanente se obtiene incrementando la cantidad de unidades nuevas.
5. Al finalizar el cronograma, la cantidad de unidades necesarias en cada estación al inicio del día está dado por la cantidad de unidades nuevas, y en caso de ser necesario se programan servicios especiales durante la noche para la reubicación de las unidades.

El modelo

Nuestro enfoque consiste en aplicar el modelo propuesto en [1]. El mismo consiste en formular convenientemente un modelo a partir del cronograma, la información sobre la demanda y las restricciones usando un digrafo que modele una red espacio-tiempo, formular la decisión como un problema de *circulación* sobre la red y resolverlo utilizando algoritmos de flujo. En nuestro caso, dadas las características de la red, se trabajará con una versión simplificada donde los trasposos ocurren únicamente en las estaciones cabecera.

Usando el ejemplo de la sección anterior, definimos un grafo dirigido $G = (V, A)$ de la siguiente forma:



- El conjunto V contiene un vértice por cada *evento* de cada servicio, es decir, por cada **arribo o partida** de un servicio.
- El conjunto A está compuesto por 3 tipos distintos de aristas:
 - **de tren**: (i, j) conecta el evento de partida y el de arribo de un servicio, representando el viaje del servicio desde su estación origen a su estación destino. Estos arcos

cuentan con una cota inferior l_{ij} de la cantidad de unidades necesarias para satisfacer la demanda y una cota superior u_{ij} de la cantidad máxima de unidades que pueden circular en un servicio. Por simplicidad, asumimos que u_{ij} es la misma para todos los servicios. El costo es $c_{ij} = 0$.

- **de traspaso:** (i, j) conecta dos eventos consecutivos (en tiempo) dentro de una estación, indicando el pasaje de unidades entre eventos. Esta arista tiene cota inferior $l_{ij} = 0$, $u_{ij} = \infty$ y costo $c_{ij} = 0$.
- **de traspaso:** en una estación, (i, j) conecta el último evento del día con el primero. Modela las condiciones de borde respecto que la cantidad de unidades al finalizar el día en una estación debe ser la necesaria para poder iniciar las operaciones al día siguiente. Inicialmente, $l_{ij} = 0$, $u_{ij} = \infty$ y $c_{ij} = 1$. Notar que la cantidad total de unidades necesarias se obtiene sumando la cantidad total de unidades que circulan por los arcos de traspaso.

Al ser un problema de *circulación*, el balance de todos los vértices es cero. Sin embargo, la presencia de cotas inferiores en los arcos de tren permiten capturar la necesidad de unidades para satisfacer la demanda.

Los datos

Los datos se proveen en formato JSON, con los siguientes campos:

- **stations:** lista con los nombres de las estaciones donde se pueden realizar traspasos. En nuestro contexto, esta lista tendrá sólo dos elementos (las estaciones cabecera).
- **cost_per_unit:** lista con el costo por unidad para los arcos de traspaso para cada estación. En el contexto del trabajo, consideramos la lista $[1, 1]$.
- **services:** diccionario que contiene como clave un `string` con el id del servicio, y como significado dos listas:
 - **stops:** lista de secuencia de eventos del servicio. Cada evento consiste en una tupla indicando el horario (`time`), la estación (`station`) y tipo de evento (D o A). Esta lista contendrá también dos elementos.
 - **demand:** lista con la demanda, medida en cantidad de pasajeros, entre eventos consecutivos. En el contexto del trabajo, esta lista tendrá un único elemento.
- **rs_info:** información asociada a las características del material rodante, en particular la capacidad de cada unidad de material rodante (`capacity`) y el máximo de unidades que puede asignarse a un servicio (`max_rs`).

El archivo `toy_instance.json` contiene la instancia descrita en la sección anterior con este formato, que puede resultar útil a fines de entender el formato y validar implementaciones iniciales del modelo.

El trabajo

El trabajo práctico consiste en resolver el problema de *circulación de material rodante* en grupos de exactamente 3 personas. La resolución del trabajo se compone de varias etapas, incluyendo el modelado, implementación, experimentación, análisis de los resultados obtenidos y la discusión sobre su impacto en el problema real.

1. **Modelo.** Investigar en detalle el modelo propuesto en [1], adaptando el modelo a las circunstancias particulares del trabajo.
2. **Análisis.** La empresa actualmente utiliza un método manual e intuitivo para abordar el problema. Analizar la efectividad del mismo mediante ejemplos en relación a una solución óptima para el problema.
3. **Algoritmo e implementación.** Modelar el problema e implementar un método para resolverlo en Python usando networkx.
4. **Datos.** Junto con el trabajo práctico se adjunta una instancia con el cronograma real del ramal Retiro-Tigre de lunes a viernes ². Se pide extender el conjunto de datos incorporando al menos un nuevo cronograma real y expandiendo el set de instancias considerando distintos escenarios de demanda en cada caso.
5. **Escenario adicional.** Se sabe que a futuro será necesario realizar obras de infraestructuras en una de las cabeceras consideradas, lo que provocará que exista una limitación en la cantidad de unidades que pueden permanecer durante la noche. Asumiendo conocida esta cantidad, proponer una forma de modelarlo e incorporar esta característica al algoritmo.
6. **Experimentación y discusión.** Realizar una experimentación exhaustiva las distintas instancias propuestas por el grupo, analizando aspectos técnicos así como también la calidad de las soluciones.
7. **Algoritmos, informe, presentación de resultados y delivery del código.** El modelo, la descripción de los modelos y algoritmos, las decisiones de diseño, la implementación, el testing realizado, la presentación de resultados, instrucciones de compilación y ejecución.

Modalidad de entrega

Se pide presentar el modelo y la experimentación en un informe de máximo 12 páginas que contenga:

- introducción al problema y la decisión,
- descripción de los algoritmos propuestos e implementados, según corresponda,
- consideraciones generales respecto a la implementación del modelo, incluyendo dificultades que hayan encontrado,
- resumen de resultados obtenidos en la experimentación,
- conclusiones, posibles mejoras y observaciones adicionales que consideren pertinentes.

Junto con el informe debe entregarse el código con la implementación del modelo. El mismo debe ser entendible, incluyendo comentarios que faciliten su corrección y ejecución.

Fechas de entrega

²Los dos primeros trenes del día en sentido Tigre - Retiro se modificaron para que partan de Tigre, manteniendo el tiempo de viaje de 54 minutos. Por simplicidad, notar también que la demanda es la misma en todos los servicios.

Formato Electrónico: **lunes 17 de junio de 2024, 23:59 hs**, enviando el trabajo (informe + código) vía el campus virtual.

Importante: El horario es estricto. Las entregas recibidas después de la hora indicada serán consideradas re-entrega.

References

- [1] Alexander Schrijver. Flows in railway optimization. *Nieuw Archief voor Wiskunde*, 9(2):126, 2008.