

“Métodos de Optimización Aplicados al Sistema de Transporte Ferroviario: en búsqueda de un enfoque integrado”

Autor:

Mas, María Magdalena y Alvarez, Ramiro Eugenio

E-mail

mmas@fce.unl.edu.ar – ramiroalvarez18@gmail.com

Eje Temático

Economía

Sección 1: Introducción

La aplicación de métodos de programación lineal a la planificación del transporte urbano de pasajeros se ha extendido como correlato de las crecientes demandas de movilidad. El transporte ferroviario no ha sido la excepción, sino más bien la regla, lo que puede explicarse en dos sentidos. En primera instancia, la centralidad que dicha modalidad ha adquirido en los sistemas de transporte de aquellos países que optaron por alterar el equilibrio intermodal (i.e.- las decisiones de los pasajeros de optar por determinado medio para satisfacer sus necesidades de movilidad) en pos de la utilización de transporte público, redundó en el surgimiento de centros científicos y universidades que recogen al sistema de transporte ferroviario como objeto de estudio con miras a la optimización de su operatividad.

En una segunda instancia, las dificultades intrínsecas al diseño de una tarificación vial óptima y la creciente utilización de medidas regulatorias de tipo Comando y Control, i.e.- aquellas en la que la sino que se basan en el poder coercitivo del Estado para arribar a una situación de movilidad socialmente deseada (Bobbio, 2012), ha conllevado la necesidad de planificar e introducir un criterio racional de provisión en aquellos modos de transportes colectivos que se presentan como alternativos al transporte individual.

En este escenario, la realidad del sistema del transporte urbano de pasajeros del Área Metropolitana de Buenos Aires (AMBA, en adelante) no escapa a las tendencias observadas en los grandes centros urbanos, donde la complejidad del desarrollo urbanístico se resume en la dispersión y discontinuidad del entramado urbano, amplificando así las necesidades de movilidad (do RosárioCarvalho, 2010). De esta forma, el actual equilibrio intermodal del AMBA puede desglosarse en un 51% representado por transporte individual, un 40% por transporte público y el 9% restante por transporte a pie (Observatorio de Movilidad Urbana. CAF, 2011). Evidenciando en América Latina una de las menores participación del transporte público en su equilibrio intermodal (Foro de Discusión sobre el FC Suburbano, 2013).

XI Jornadas de Investigación de la Facultad de Ciencias Económicas

“Conocimiento e Innovación en la FCE”

En relación a lo anterior, las conclusiones que se desprendieron del Foro de Discusión sobre el Ferrocarril Suburbano, llevadas a cabo por el Instituto Tecnológico Ferroviario de la Universidad Nacional de San Martín (en adelante, ITF – UNSAM) en 2013, pueden resumirse en la siguiente idea:

“La mejora de los servicios ferroviarios metropolitanos debe encararse a partir de la definición del rol que debe cumplir el ferrocarril en el conjunto de la movilidad urbana. Su reestructuración debe realizarse a partir de una redefinición del entramado intermodal, asignándole al ferrocarril una función en ese complejo de movilidad, basado en sus fortalezas y en sus potencialidades frente a otros modos de transporte.”(Foro de Discusión sobre el FC Suburbano, 2013).

La necesidad de una mirada integral del sistema de movilidad urbana, a la hora de planificar el sistema de transporte ferroviario, ha sido una constante de las experiencias de política ferroviaria europea. Así, siguiendo a Bussieck (1998) y Lindner (2000), el conjunto de las problemáticas que debe estar contempladas en todo intento de planificación del sistema ferroviario de pasajeros, pueden abordarse a través de un proceso jerárquico y secuencial que comprende: 1) el análisis de la demanda por medio de una matriz Origen-Destino, 2) la planificación de las líneas, 3) la planificación de la programación ferroviaria y 4) la planificación de la administración del material rodante y gestión de recursos. Esta racionalización es conocida como Planeamiento Jerárquico del Transporte Ferroviario (PJTF, en adelante) y ha sido adoptada para el abordaje de las distintas problemáticas que afectaron a los sistemas de transporte en Europa, desde la reconstrucción en los tiempos de posguerra hasta el desafío que significaba la unificación alemana a comienzos de la década de 1990.

En este proceso secuencial sobresalen dos eslabones, la planificación de líneas ferroviarias y la programación del sistema, en los que las técnicas de programación lineal han sido particularmente aplicadas según diversos criterios de optimización.

En síntesis, el problema de planificación línea consiste en la elección de un conjunto de líneas de operación que cumple con la demanda de pasajeros y optimiza un objetivo dado. Habiendo determinado el set de líneas óptimas, el problema de la planificación la programación periódica consiste en la especificación de los tiempos de llegada y partida de dichas líneas a ciertos puntos de la red ferroviaria con miras al cumplimiento de criterios considerados óptimos.

Vale la pena mencionar que, debido a la secuencialidad del Planeamiento Jerárquico, no existe a priori necesidad de coincidencia en los modelos de optimización aplicados a cada eslabón.

“The disadvantages of this top-down approach are obvious, because the optimal output of a subtask which serves as the input of a subsequent task, will, in general, not result in an overall optimal solution. Nevertheless, this hierarchy decomposes the planning process in manageable segments and reflects the current internal structure of the railroad companies” (Bussieck, 1998, pp.6)

En este sentido, lo que a priori parecería una desventaja del PJTF, debido al sistemático arribo de soluciones que tienen un carácter de optimabilidad específico, por estar circunscriptas a eslabones particulares de un proceso jerárquico, autores como Bussieck y Lindler lo presentan como principal ventaja por dar una adecuada representación de un proceso fragmentado y secuencial que caracteriza la estructura administrativa sobre la que se establece la decisión de provisión del transporte ferroviario. Esta particular estructura interna del sistema ferroviario quedó especialmente determinado con la privatización y concesión de las tradicionales empresas públicas que operaron tradicionalmente el transporte ferroviario, en tanto monopolio natural por excelencia.

Sin embargo, el desempeño de tales políticas regulatorias, tanto a nivel global como regional, se encuentra lejos de generar un consenso generalizado acerca de su conveniencia (Sharp, 2005), con lo cual resulta imperante la formulación de modelos de optimización que intenten avanzar en un abordaje más integral, es decir, pensando en interrelacionar los problemas de planificación de líneas y programación ferroviaria, con miras al arribo de soluciones óptimas globales.

El presente trabajo pretende caracterizar los fundamentos de los problemas de optimización aplicados a la planificación de líneas y a la programación ferroviaria. Esto es, identificar el conjunto de funciones objetivos, restricciones, variables exógenas y endógenas de cada problema, con miras al futuro diseño de un único modelo que permita integrar ambos problemas, ganando así en generalidad y en la obtención de un óptimo global.

El aporte, en esta primera instancia, pretende restringirse a un plano meramente descriptivo de los fundamentos de cada problema, especificando el conjunto de variables que reúnen la doble condición de ser endógenas del problema de planificación de líneas y exógenas al problema de programación.

Sección 2: Los fundamentos de la optimización aplicada a transporte ferroviarios de pasajeros.

Siguiendo a Bussieck (1998) y Lindner (2000), el conjunto de las problemáticas que se reúnen en torno al sistema de transporte ferroviario de pasajeros y que debe estar contemplado en todo intento de planificación del servicio, puede racionalizarse en un proceso jerárquico y secuencial que comprende el análisis de la demanda, la planificación de las líneas, la planificación de la programación ferroviaria, la planificación de material rodante y la administración o gestión de recursos. Esta racionalización es conocida como Planeamiento Jerárquico del Transporte Ferroviario y ha sido adoptada para el abordaje de las distintas problemáticas que afectaron a los sistemas de transporte en Europa, desde la reconstrucción en los tiempos de posguerra hasta el desafío que significó la unificación alemana a comienzos del decenio de 1990.

En tanto eslabones del Planeamiento Jerárquico del Transporte Ferroviario abordado por técnicas de programación lineal, sobresalen dos: 1) El planeamiento de líneas y 2) El planeamiento de la Programación Ferroviaria.

Ambos problemas son planteados en términos de secuencialidad. La determinación de líneas consiste en la especificación de un recorrido o ruta, i.e.- conexión entre estaciones, con un ciclo temporal o frecuencia, el primer problema se basa en escoger un conjunto de líneas que satisfaga tanto la demanda de movilidad (representada por medio de una matriz origen-destino) como ciertos objetivos de optimización.

Posteriormente, la planificación de la programación según un criterio de optimización consistirá en el diseño de un programa, i.e.-horarios de partidas y llegadas de trenes a las estaciones de la red ferroviaria, tomando como dato el número de trenes y los ciclos de tiempo.

Esta reconstrucción descriptiva del Planeamiento Jerárquico del Sistema de Transporte Ferroviario apunta a identificar a la frecuencia, es decir al números de trenes que unen estaciones y al tiempo cíclico de circulación, como el punto de encuentro entre ambos problemas y, por tanto, la columna vertebral sobre la cual estructurar un modelo integrador.

Con miras a especificar analíticamente el punto de encuentro entre ambos problemas, se procederá a la exposición de los fundamentos que se reúnen en torno a la Planificación de Líneas, en primer lugar, y a la Programación Ferroviaria, seguidamente.

Fundamentos del Problema de la Planificación de Líneas.

XI Jornadas de Investigación de la Facultad de Ciencias Económicas

"Conocimiento e Innovación en la FCE"

En primer lugar se definirán los términos que se utilizarán tanto en el Problema de la Planificación de Líneas como en el Problema de Programación.

Una *Red Ferroviaria*, usualmente se representa por grafos no dirigidos: $G = (V; E)$, donde V es el conjunto de nodos, representando a las estaciones o puntos estratégicos :

$V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ y E es el conjunto de bordes, haciendo referencia a las redes de ferrocarril o las vías : $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$, tal que $e_k = (v_i, v_{i+1}) \in E$ para cualquier $i \in \{1, \dots, n-1\}$.

Una sucesión $v_1, v_2, \dots, v_k, k \geq 1$, es un camino de v_1 a v_k si $v_{i-1}v_i \in E$ para $i=1, \dots, k$, donde v_1 es el nodo origen , v_k es el nodo destino y los nodos $v_2, \dots, v_{k-1}$ son nodos intermediarios. Se va a representar un *camino* como la sucesión de $e_1, e_2, \dots, e_k$, donde $e_i = v_{i-1}v_i$ para $i=1, \dots, k$.

Para el Problema de Planificación de Línea, cuando se refiere a una línea, se especifica además la frecuencia $\phi \in \mathbb{Z}_+$. La frecuencia $\phi \in \mathbb{Z}_+$: es el número de trenes que cubren el camino o ruta dentro de un período de tiempo $[0; \dots; \tau)$. El concepto de Frecuencia de línea expresa las limitaciones operativas y de capacidad.

Con el objetivo de simplificar la notación $\mathbf{e}$ representará el camino o ruta que va de un nodo a otro. Para cada $\mathbf{e}$, se introducen límites inferiores y superiores a partir de la regulación respectiva, estos límites se simbolizan:

$\underline{lfr}(\mathbf{e}) \leq \overline{lfr}(\mathbf{e})$, que es el número de trenes en el intervalo de tiempo básico.

Las restricciones que se pueden plantear en el modelo usando $\underline{lfr}(\mathbf{e}), \overline{lfr}(\mathbf{e})$ son:

- Para una frecuencia usada en el camino $\mathbf{e}$, que satisface las regulaciones, por ejemplo el mínimo avance h , es decir la distancia temporal entre dos trenes consecutivos:

$$\underline{lfr}(\mathbf{e}) \leq \lceil \tau/h \rceil$$

- En el plan de línea designado debe transportar a todos los pasajeros, la carga del tren en el camino $\mathbf{e}$ $ld(\mathbf{e})$, está relacionado con un número fijo que es la capacidad del tren, simbolizada por C , esto da un límite inferior al número de trenes necesarios:

$$\underline{lfr}(\mathbf{e}) \geq \lceil ld(\mathbf{e})/C \rceil$$

- Para una razón económica el número de asientos vacíos debe estar limitado superiormente, por ejemplo un $G\%$, esto se puede expresar de la siguiente manera:

$$\underline{lfr}(\mathbf{e}) \leq \left\lceil \left(1 + \frac{G}{100}\right) ld(\mathbf{e})/C \right\rceil$$

Los ejemplos anteriores demuestran que la carga del tráfico $ld(\mathbf{e})$, juega un papel muy importante en el cómputo de $\underline{lfr}(\mathbf{e})$ y $\overline{lfr}(\mathbf{e})$. El cálculo de $ld(\mathbf{e})$, depende de la demanda y de la frecuencia de cada tramo.

Otra restricción importante que debe cumplir un plan de línea es que para cada tramo $\mathbf{e}$, la frecuencia debe cumplir:

$$\underline{lfr}(\mathbf{e}) \leq \sum_{\mathbf{e} \in E} \varphi \leq \overline{lfr}(\mathbf{e})$$

Debido a las limitaciones estrictas para las rutas en una red ferroviaria, el conjunto de posibles rutas R es bastante pequeña. Por lo tanto un modelo que incluye las rutas de forma explícita es de mucho interés. Para lo cual, se introduce un vector entero $x \in \mathbb{Z}_+^{|R|}$, donde x_u representa la frecuencia de la línea utilizando la ruta $u \in R$. De acuerdo con esta representación particular de líneas, el conjunto de Plan de Línea Factible L puede ser descrito de la siguiente manera:

XI Jornadas de Investigación de la Facultad de Ciencias Económicas

"Conocimiento e Innovación en la FCE"

$$L = \left\{ x \in Z_+^{|R|} : \underline{lfr}(e) \leq \sum_{\substack{u \in R \\ e \in E}} x_u \leq \overline{lfr}(e) \quad \forall e \in E \right\}$$

Las ecuaciones o inecuaciones donde aparece la expresión: $\sum_{\substack{u \in R \\ e \in E}} x_u$, se puede representar a través de la Matriz de Incidencia de tramo y ruta, $|E| \times |R|$, simbolizada por $M = (a_{eu})$ donde:

$$a_{eu} = \begin{cases} 1 & \text{si } e \in u \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{cases}$$

Por lo tanto se puede definir el conjunto de Plan de Línea Factible L , de la siguiente manera:

$$L = \left\{ x \in Z_+^{|R|} : \underline{lfr}(e) \leq Mx \leq \overline{lfr}(e) \quad \forall e \in E \right\}$$

Este modelo potente del Plan de Línea Factible permite incluir fácilmente nuevas restricciones operativas.

En general, el conjunto L contiene un sinnúmero de planes de línea factibles y no es obvio qué plan de línea debe ser elegido. La optimización ayuda a superar la cuestión si las autoridades tienen un objetivo concreto en mente, como puede ser minimizar los costos, maximizar los beneficios, minimizar el tiempo de viaje.

Fundamentos del Problema de Programación

Adentrándose en la modelización del problema de optimización de la programación, siguiendo a Lindner (2000), primeramente se definirán nuevos términos que se usaran en el modelo.

Una *línea* (ferroviaria de pasajeros), que se simboliza con r , está modelada como un vector de nodos $(v_1, \dots, v_n)$ con $v_i \in V$ para $i \in \{1, \dots, n\}$, $v_i \neq v_j$ si $i \neq j$, luego $r = (v_1, \dots, v_n)$ significa que los trenes de esta línea van de v_1 a v_n (vía $v_2, \dots$) y de regreso a v_1 vía v_{n-1} .

Se asume que todas las líneas tienen el mismo período de tiempo básico $T \in \mathbb{N}$. De llegar a haber diferentes periodos de tiempo asociados a las diferentes líneas, se trabajará con un mínimo común múltiplo. Se recurre a dicha simplificación a los efectos de facilitar la exposición del problema de maximización

El conjunto de Líneas se simbolizará con R , es relevante notar que los elementos de R son vectores que pueden tener diferentes dimensiones. Este dato es suministrado por el problema expuesto en la sección anterior

En general, los eventos que tienen que ser programados son las llegadas y salidas de líneas a una misma estación, que están representadas por nodos $v \in V$. Se definen eventos periódicos: a la llegada o salida de una línea y evento individual: a la llegada o salida de un tren particular de una línea

Un horario o cronograma $\hat{\pi}$ para un conjunto de eventos $\hat{E}$ es una función:

$\hat{\pi}: \hat{E} \rightarrow \mathbb{R} / \hat{\pi}(\hat{e})$, que se llama horario del evento $\hat{e}$.

Sea el conjunto E de eventos periódicos e , que está formado por un conjunto numerable de eventos individuales, es decir:

$\{e^{(i)} / i \in \mathbb{Z}\}$ tal que $\hat{\pi}(e^{(i)}) = \hat{\pi}(e^{(0)}) + Ti$, donde T es el período de tiempo básico asociado a la frecuencia que caracteriza a la línea y que constituyó la variable a determinar en el problema de optimización de líneas.

Para definir el horario de un evento periódico, deben estar definidos los horarios de los eventos individuales y la frecuencia T .

Para un conjunto E de eventos periódicos, sea $E^0 = \{e^{(0)} / e \in E\}$. Para asignar el horario a cada elemento de E^0 , todos los horarios de los eventos individuales de los elementos de E fueron asignados previamente.

Un horario π para un conjunto de eventos periódicos E es una función:

$$\pi: E \rightarrow R / \pi(e) = x \Leftrightarrow \hat{\pi}(e^{(0)}) = x \text{ para cada } e \in E$$

Para eventos periódicos se va a usar la siguiente notación:

$a_{r,\mu}^v$: llegada de la línea r , en la dirección μ , a la estación v .

$d_{r,\mu}^v$: salida de la línea r , en la dirección μ , de la estación v .

Si $r = (v_1, \dots, v_n)$ la dirección puede ser 0 (si va desde v_1 a v_n) ó 1 si regresa. En general éste índice se omite, salvo que conlleve una potencial confusión.

Viaje: es un evento individual de eventos periódicos que corresponde a la salida o a la llegada del tren a través de una línea.

Restricción de Intervalos Periódicos para eventos periódicos:

$$\pi(\acute{e}) = \pi(e) + [l; u]_T \Leftrightarrow \hat{\pi}(e^{(0)}) + l \leq \hat{\pi}(\acute{e}^{(0)}) - z. T \leq \hat{\pi}(e^{(0)}) + u, \text{ para } z \in Z \quad (1)$$

Donde $e, \acute{e} \in E$; $l, u \in R$.

Realizadas las definiciones pertinentes que permitirán introducir los fundamentos del problema de optimización de la programación del transporte ferroviario de pasajeros, a continuación se explicitará las distintas restricciones temporales que se debe incorporar al modelo, por estar involucradas en la asignación de movilidad.

1. *Restricción de Tiempo de Viaje*: si se supone que $(v, v') \in r$ donde l es el mínimo y u el máximo tiempo permitido para el tren de la línea r del trayecto v a v' , entonces:

$$\pi(a_{r,0}^{v'}) = \pi(d_{r,0}^v) + [l; u]_T \quad (2)$$

El horario de llegada de v a v' por la línea r es igual al tiempo de salida de v por la línea r más el intervalo de tiempo permitido.

2. *Restricción de Tiempo de Espera*: Si el tiempo de espera de la línea r en la estación v tiene que ser $[l; u]$, se debe cumplir la siguiente restricción:

$$\pi(d_{r,0}^v) = \pi(a_{r,0}^v) + [l; u]_T \quad (3)$$

El horario de salida a v por la línea r es igual al tiempo de llegada a v por la línea r más el tiempo de espera.

3. *Restricción de Tiempo de Regreso*: Si $r = (v_1, \dots, v_n)$, se necesita la restricción de la siguiente forma:

$$\pi(a_{r,1}^{v_n}) = \pi(d_{r,0}^{v_n}) + [l; u]_T \quad (4)$$

El horario de llegada de regreso a v_n por la línea r es igual al horario de salida de ida a v_n por la línea r más $[l; u]_T$. No es necesario plantear la restricción en la otra dirección, porque está dada implícitamente por la restricción de intervalos periódicos.

4. *Restricción de Tiempo de Cambio de Tren*: Algunos pasajeros necesitan cambiar de un tren a otro, es decir necesitan un tiempo de combinación entre trenes, para lo cual debe cumplirse la siguiente restricción:

$$\pi(d_{r_j,\mu_j}^v) = \pi(a_{r,\mu}^v) + [l; u]_T \quad (5)$$

El horario de salida de la estación v , por la línea r_j en la dirección μ_j es igual al horario de llegada a la estación v por la línea r en la dirección μ más el tiempo $[l; u]_T$

Resulta difícil determinar una estación v y las líneas r y r_j , de tal manera que se cumpla ésta restricción.

5. *Restricción de Tiempo de Avance*: Si $(v; v') \in r_1$ y $(v; v') \in r_2$ para r_1 y $r_2 \in R$ y hay una sola vía de ferrocarril que va desde v a v' , los trenes de las líneas r_1 y r_2 deben andar sobre la misma vía. Para evitar accidentes, deben guardar cierta distancia, que es lo mismo que guardar cierto tiempo de espera o avance. Si la velocidad del tren es constante (lo cual se

XI Jornadas de Investigación de la Facultad de Ciencias Económicas

“Conocimiento e Innovación en la FCE”

supone para planificar un modelo estratégico) los tiempos de avance solo son garantizados en la estación, lo que lleva a una restricción de intervalo periódico para los horarios de salida y una restricción para el horario de llegada.

$$\pi(d_{r_2, \mu}^v) = \pi(d_{r_1, \mu}^v) + [l; u]_T \quad (6)$$

$$\pi(a_{r_2, \mu}^v) = \pi(a_{r_1, \mu}^v) + [l; u]_T \quad (7)$$

El horario de salida de la estación v de la línea r_2 en la dirección μ es igual al horario de salida de la estación v de la línea r_1 , en la dirección μ más el tiempo $[l; u]_T$

El horario de llegada a la estación v' de la línea r_2 en la dirección μ es igual al horario de llegada a la estación v' de la línea r_1 , en la dirección μ más el tiempo $[l; u]_T$.

Es necesario un límite superior en el tiempo de avance, porque tiene que haber un tiempo de avance para el tren precedente y para el tren posterior. En algunos casos estas restricciones no tienen el efecto deseado.

Cada uno de los intervalos $[l; u]_T$ presentes en las distintas restricciones se encuentran determinados por el conjunto de líneas al que se arribó al resolver el Problema de Planificación de Líneas, en tanto óptimas según un criterio de optimalidad.

Así, Serafini y Ukovich (1989) definieron los fundamentos del Problema de Programación de Eventos Periódicos (en adelante PESP) en los siguientes términos:

Datos o variables exógenas:

T: período de Tiempo o Frecuencia,

E: Conjunto de eventos periódicos.

C: Conjunto de Restricciones de intervalos periódicos para E

Encontrar: $\pi: E \rightarrow R$ una función que describa el cronograma de los horarios del tren, satisfaciendo todas las restricciones definidas en C, de lo contrario el problema se declara infactible.

El PESP es una base para cualquier modelo de Optimización de Programación.

Frecuentemente el PESP es interpretado como un problema de Grafos de Eventos.

$G = (V_G, A_G)$ se encuentra definida de la siguiente manera:

Para cada $e \in E$ es el nodo $v_e \in V_G$

Para cada $(e, e', l, u) \in C$. Esto es un arco que va desde v_e a $v_{e'}$ con el correspondiente intervalo periódico $[l; u]_T$

A su vez, el PESP se puede interpretar como un problema lineal con variables enteras, porque el modelo está definido como un conjunto de inecuaciones lineales y algunas variables toman valor entero.

La solución para $\pi(e)$, donde π es el vector de $\pi(e)$, $e \in E$ y z es un vector de $z_c, c \in C$ para el problema:

$$\begin{cases} l \leq \pi(e') - \pi(e) - z_c \cdot T \leq u, & \text{para cada } c = (e, e', l, u) \in C \\ \pi(e) \in R & \text{para cada } e \in E \\ z_c \in Z & \text{para cada } c \in C \end{cases} \quad (8)$$

Puede haber algunas extensiones del modelo, según las características y necesidades de cada cronograma. Por ejemplo conexión en una sola vía: la conexión en una sola vía (es decir donde la misma vía es usada por los trenes en ambas direcciones) obviamente no pueden ser usadas en el mismo momento. Si la línea 1 se dirige de v a v' y la línea 2 de v' a v por la misma vía, debe cumplirse la siguiente restricción:

$$\begin{cases} \hat{\pi}(d_{l_2}^{v'(0)}) \geq \hat{\pi}(a_{l_1}^{v(0)}) - z \cdot T, z \in Z \\ \hat{\pi}(a_{l_2}^{v(0)}) \leq \hat{\pi}(d_{l_1}^{v'(0)}) - z \cdot T + T & \text{para el mismo } z \end{cases} \quad (9)$$

Otra situación puede ser que un tren de la línea 2 pueda arrancar solamente después que llegue el tren de la línea 1 a v y debe llegar a v después que el próximo tren de la línea 1 parta de allí.

Estas restricciones no son restricciones de intervalos periódicos. Solamente si el tiempo de viaje es constante, ellas pueden transformarse en restricciones de intervalos.

$$\begin{cases} \hat{\pi}(a_{l_1}^{v(0)}) = \hat{\pi}(d_{l_1}^{v(0)}) + t_1 \\ \hat{\pi}(a_{l_2}^{v(0)}) = \hat{\pi}(d_{l_2}^{v(0)}) + t_2 \end{cases}$$

Entonces: $\hat{\pi}(d_{l_1}^{v(0)}) + t_1 \leq \hat{\pi}(d_{l_2}^{v(0)}) - z \cdot T \leq \hat{\pi}(d_{l_1}^{v(0)}) + T - t_2$

La provisión de movilidad ferroviaria puede estar determinada por diferentes criterios al momento de plantear la optimización de la programación del servicio, por ello se describirán brevemente algunas de ellas:

- *Minimización del tiempo de viaje para el pasajero:* un objetivo importante es tratar de que el tiempo de viaje para el pasajero sea lo menor posible. Como la velocidad de los trenes es un valor que ya está fijado el tiempo de viaje va a depender más del tiempo de demora del mismo o del tiempo de espera para realizar la combinación de tren necesaria. En el caso que se defina como variable el tiempo de cambio de tren, esta debe ser lo menor posible.

Sea $\bar{C} \subseteq C$, el conjunto de restricciones de tiempo de cambio de tren. Se supone que para cualquier $c \in \bar{C}$, el número de pasajeros ω_c que necesitan hacer la conexión respectiva es conocido (en la realidad es un número difícil de determinar), entonces la suma del tiempo de espera de todos los pasajeros está dada por:

$$\sum_{(a_{l_1, u_1}^v, d_{l_2, u_2}^v, l, u) = c \in \bar{C}} \omega_c \cdot (\pi(d_{l_2, u_2}^v) - \pi(a_{l_2, u_2}^v) - z_c \cdot T) \quad (10)$$

Esta es una expresión lineal dentro del valor de $\pi(e)$ y se puede agregar a la formulación de PESP con el fin de obtener un Problema de Programación Lineal Entero Mixto.

- *Maximización de la consistencia en el caso de la demora del tren:* en la práctica la demora del tren ocurre con frecuencia. En ésta situación hay otro tren que debe ocupar la misma vía y debe esperar y esto provoca un sistema de demora que crece en forma de cascada. Además si el pasajero debe hacer combinación con otro tren, puede perder el otro tren. Alternativamente, otros trenes deben esperar y nuevamente el retraso total aumenta. Para evitar esto, se puede maximizar, el mínimo del tiempo de avance de los trenes que llegan o salen de la misma estación. Como una consecuencia de lo dicho, todos los trenes deben avanzar más de lo que se requiere actualmente. En el caso de demora, la correspondiente restricción puede cumplirse o no siempre y cuando se garantice el avance requerido.
- *Maximización del Beneficio/ Minimización de los Costos:* en éste caso hay varias ideas para estimar el beneficio/costo de la programación de trenes, resultando diferentes modelos de Optimización en la programación.
Brännlund et al (1998) desarrolló un modelo de maximización de beneficio donde plantea que el beneficio depende del horario que ciertos trenes pasan por ciertas partes de la red ferroviaria. En cambio Carey (1994) considera minimizar el costo, donde los costos de los tiempos de viaje son tiempos de costos o tiempos de costos especiales de llegada o salida. Otro modelo introducido por Higgins (1996) usa la suma ponderada de demora y de costos operativos del tren.

XI Jornadas de Investigación de la Facultad de Ciencias Económicas

“Conocimiento e Innovación en la FCE”

- *Minimización de períodos:* Puede haber situaciones en las cuales interese el mínimo período posible para el sistema del tráfico. Este enfoque es diferente a los anteriores, porque la variable es el período.
- *Minimizar la infactibilidad en una instancia del PESP:* sea π un cronograma, el cual puede ser infactible en una instancia del PESP. Entonces para cada $c = (e, \acute{e}, l, u) \in C$, la “restricción violada” ε_c se define:

$$\varepsilon_c = \min_{z_c \in \mathbb{Z}} \max\{0, \pi(\acute{e}) - \pi(e) - z_c \cdot T - u, l - (\pi(\acute{e}) - \pi(e) - z_c \cdot T)\} \quad (11)$$

Algunas posibilidades para minimizar la infactibilidad usando ε_c son:

- ✓ Encontrar un cronograma π tal que el número de restricciones c con $\varepsilon_c > 0$ sea mínimo.
- ✓ Encontrar un cronograma π tal que $\sum_{c \in C} \varepsilon_c$ sea mínimo.
- ✓ Encontrar un cronograma π tal que $\max_{c \in C} \varepsilon_c$ sea mínimo.

Resulta valido afirmar que en los sistemas ferroviarios de pasajeros actuales, la optimización del PESP no se encuentra en función de un único criterio, sino que responderá a múltiples objetivos.

De acuerdo a los distintos grados intervención estatal mediante la especificación en un marco regulatorio, la ponderación de un criterio respecto de otro será mayor dependiendo las realidades en las que esté inserto el sistema ferroviario de pasajeros. Tal y como lo plantea Baron (1995) “[B]ecause there is no clear perspective, transport policy and planning will remain a playing field of scientists, lobbyist, politicians, gurus, fanatics and concerned citizens for many year to come, and it will keep generations of journalists busy” (Baron, 1995, pp.20).

Sección 3: Análisis y Síntesis de los Fundamentos.

En esta sección se presentará sintéticamente los fundamentos de cada problema de optimización con miras de identificar variables que reúnan la característica de ser endógenas al planeamiento óptimo de las líneas ferroviarias y exógenas al problema de programación.

	Optimización de Líneas	Optimización de Programación a través del PESP
Variables Exógenas	Ta;b: número de pasajeros viajando de la estación (a) a (b). R: conjunto de rutas y material rodante de una red ferroviaria. C: conjunto de Restricciones operativas y de capacidad para R	T: período de Tiempo o Frecuencia, E: Conjunto de eventos periódicos. C: Conjunto de Restricciones de intervalos periódicos para E
Variables Endógenas	L: conjuntos de Líneas que depende de la ruta y de la frecuencia $\phi \in \mathbb{Z}_+$, y satisfacen todas las restricciones definidas que satisfagan todas las	$\pi: E \rightarrow R$ una función que describa el cronograma de los horarios del tren, satisfaciendo todas las restricciones definidas

	restricciones definidas	
--	-------------------------	--

De esta forma queda explícita la conexión entre ambos problemas por medio de la determinación de la frecuencia asociada a la línea óptima y la utilización de la misma para la obtención de un programa de llegadas y salidas de cada estación que cumpla con el conjunto de restricciones. En este sentido, es posible afirmar que la modelización en la determinación de la frecuencia óptima resultará fundamental para futuros avances en la construcción de un modelo de optimización aplicado al planeamiento de líneas y de programación que arribe a soluciones de mayor alcance en su generalidad.

Tal como se aprecia en la presentación del problema de programación, la función objetivo, variará en cuanto a su forma según el criterio de optimización, siendo así de trascendental importancia la coincidencia de los mismos para la construcción de un modelo PARA arribar a soluciones globales. Esta coincidencia constituye una característica más propia de aquel sistema ferroviario donde las decisiones de administración y operación se hallen centralizadas.

Esta condición adquiere sentido cuando logra comprenderse que la multiplicidad de criterios de optimización que se aplican a los problemas secuenciales del Planeamiento Jerárquico del sistema ferroviario puede implicar el recurrir a problemas no lineales, con las consecuencias que ello implica al momento de resolverlo.

Sección 4: Conclusiones y lineamientos a profundizar.

La situación imperante en el sistema de transporte en el AMBA evidencia un marcado sesgo hacia la participación del transporte individual, modalidad a la que se intenta ofrecer alternativas de acuerdo las definiciones imperantes de movilidad sustentable (Bobbio, 2012; Pereira Dos Santos Carvalho, 2010).

La experiencia europea, pero fundamentalmente alemana y holandesa, expuesta en autores como Törnquist (2005), pero también como Bussieck (1998) y Lindner (2000) rescatan el planeamiento del Sistema Ferroviario, en tanto procedimiento racionalizado y secuencial que permitió replantear el sistema de transporte en la modalidad ferroviaria pero, a su vez, al partir de un análisis exhaustivo de las necesidades de movilidad de los pasajeros, explicita el transporte ferroviario como un subsistema del sistema de transporte urbano. En este sentido, el PJTF se presenta como una herramienta capaz de dar una mirada sistémica al transporte ferroviario de pasajeros del AMBA, en línea con lo concluido por el foro de discusión organizado por el ITF – UNSAM. Dentro de dicho proceso se destacan los aportes que desde la programación lineal se dirigen al arribo de soluciones óptimas para la planificación de líneas y de programación ferroviaria.

Una característica inherente a dicha estrategia se basa en el abordaje fragmentario de las problemáticas que se eslabonan en el planeamiento. Esto si bien redundando en la imposibilidad de obtener una solución óptima general, los autores tratados lo terminan presentando como una ventaja, al dar una representación más fidedigna de la estructuración administrativa que caracterizan a la mayoría de los sistemas ferroviarios luego de la generalización de privatizaciones y concesiones del servicio, en tanto modalidad regulatoria.

No obstante, no existe consenso acerca de la conveniencia de dichas políticas, redundando en la revisión por parte de muchos Estados de sus políticas ferroviarias. Así, el presente trabajo intentó constituir un aporte con miras a indagar en los fundamentos de los problemas de optimización para el diseño futuro de modelos que permitan integrar la optimización de líneas y de programación,

XI Jornadas de Investigación de la Facultad de Ciencias Económicas

“Conocimiento e Innovación en la FCE”

arribando a la conclusión de la necesidad de coincidencia en los criterios de optimización que posibiliten la obtención de soluciones globales.

Bibliografía:

- BARON, P. (1995) *Transportation in Germany: A Historical Overview*. TransportationResearch Vol. A29. Great Britain.
- BOBBIO, H. (2012), *Análisis de las externalidades y políticas de regulación del transporte urbano de pasajeros*, Tesina de grado de Licenciatura en Economía, Facultad de Ciencias Económicas, Universidad Nacional del Litoral.
- BRÄNNLUND, U., LINDBERG, P.O., NÖU, A. and NILSSON, J.E. (1998) *Railway Timetabling using Lagrangian Relaxation*. Transportation Science 32 (4).
- BUSSIECK, M.R. (1998), *Optimal Lines in Public Rail Transport*, PhD thesis, Technische Universität Braunschweig.
- CAREY, M. (1994) *A model strategy for train pathing with choice of line, platforms and routes*. Transportation Research B 28 (5).
- FORO DE DISCUSIÓN SOBRE EL FC SUBURBANO UNSAM – ITF (2013) *Una estrategia para la rehabilitación de ferrocarriles metropolitanos de Buenos Aires*.
- HIGGINS, A., KOZAN, E. and FERREIRA, L. (1996) *Optimal Scheduling of trains on a single line track*. Transportation Research B, 30 (2).
- LINDNER, T. (2000), *Train Schedule Optimization in Public Rail Transport*, PhD thesis, Technische Universität Braunschweig.
- PEREIRA DOS SANTOS CARVALHO, A. C. (2010). *Regulação e Concorrência dos transportes colectivos urbanos: a Região Metropolitana de Lisboa*. Tesis de Maestría en Economía y Políticas Públicas. Instituto Superior de Economia e Gestão, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal.
- PÉREZ SALAS, G. y SÁNCHEZ, R. (2010), *Convergencia y divergencia en las políticas de transporte y movilidad en América Latina: Ausencia de co-modalismo urbano*, CODATU XIV, Octubre 2010.
- SERAFINI, P. and UKOVICH, W. (1989) *A mathematical model for fixed-time traffic control problem*, European J. Oper. Res. 42.
- SHARP, R. (2005) *Resultados de la Privatización de Ferrocarriles en América Latina*, The World Bank Group. Washington D.C. EUA.