

OPTIMIZACIÓN APLICADA A LA PROGRAMACIÓN DE TRANSPORTE FERROVIARIO DE PASAJEROS

RAMIRO EUGENIO ÁLVAREZ - MARÍA MAGDALENA MAS

Universidad Nacional del Litoral (UNL).

Bv. Pellegrini 2750 Provincia de Santa Fe República Argentina

Ramiroalvarez18@gmail.com - mamagmas@gmail.com

Resumen

La aplicación de métodos de optimización a la planificación del transporte 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. Esto se explica por la centralidad que dicha modalidad ha adquirido en los sistemas de transporte de aquellos países que han decidido 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.

El presente trabajo pretende indagar en los fundamentos del problema que enfrentan los operarios de una red ferroviaria para asignación de un cronograma óptimo de partidas y llegadas, de forma tal de resolver los conflictos que se suscitan cuando dos o más trenes se disponen a utilizar simultáneamente la misma parte de la red ferroviaria, considerando la demanda, los niveles de seguridad y los efectos de dicho resultado sobre la administración de la totalidad de la red. Así, se procederá a la especificación de las variables, restricciones y objetivos que entran en la consideración en lo que constituye el Problema de Programación de Eventos Periódicos (PESP, por sus siglas en inglés).

Sobre la base de la experiencia europea, se intenta ofrecer una aproximación a los aportes de dicha metodología al sistema ferroviario de pasajeros, con miras a identificar conclusiones susceptibles de ser incorporadas en la regulación y administración del sistema ferroviario de pasajeros en el AMBA (Área Metropolitana de Buenos Aires)

Palabras Clave: transporte ferroviario, optimización, programación, regulación.

OPTIMIZATION APPLIED TO SCHEDULING RAIL PASSENGER TRANSPORT

RAMIRO EUGENIO ÁLVAREZ - MARÍA MAGDALENA MAS

Universidad Nacional del Litoral (UNL).

Bv. Pellegrini 2750 Provincia de Santa Fe República Argentina

Ramiroalvarez18@gmail.com - mamagmas@gmail.com

Abstract

The appliance of optimization methods to the passengers-planning has enlarged itself as a co relate of the increasing demands of mobility. The railway transport has not been the exception but the rule. This is explained by the centralization that this mode has been taking in the transport systems of those countries that decided to alter the intermodal equilibrium (i.e. the passengers' decisions to choose certain ways to satisfy their needs of mobility) in pursuit of using public transports.

This work intends to seek on the basis of the problem that the operators of a railway-net face to determine an utmost chronogram of frequencies in order to solve the troubles that appears when two or more trains want to use the same stretch of the railway-net simultaneously considering the demand, security levees and the effects of such result when managing the whole net. In this way, it comes out the specification of the variables, restrictions and targets that should be taken into account in what the Problem of Periodical Events Programmation (PESP english siglas) sets.

On the basis of the European experience, it's intended to offer an approach to the contribution of such methodology with the aim of getting conclusions which are likely to be added to the regulation and administration of the railway system of passengers in the Metropolitan Area of Buenos Aires.

Key words Transport - Optimization- Regulation

1. Introducción

El presente estudio se enmarca dentro del proyecto “Regulación de servicios públicos en Europa, Latinoamérica y Argentina: el caso del transporte urbano”, y pretende constituir un aporte a la regulación del Sistema de Transporte Ferroviario de Pasajeros en el Área Metropolitana de Buenos Aires (en adelante AMBA) a partir del estudio de los fundamentos de métodos de optimización aplicados al diseño de programación o *scheduling* de líneas ferroviarias.

En el presente, la población que habita en las ciudades de los países en desarrollo se expande a un ritmo superior al 6% anual. Aproximadamente, el 75% de la población de América Latina y el Caribe vive en ciudades y se estima que para el año 2020 dicha tasa de urbanización alcance al 80,4% (Naciones Unidas, 2010, citado en Pérez Salas et al, 2010). Este proceso continuo de urbanización ha exigido el desarrollo de nuevas estrategias en la prestación de los diferentes servicios para el adecuado funcionamiento de los crecientes centros urbanos.

El desarrollo de las ciudades no puede ser entendido aisladamente de los cambios fundamentales de la organización económica (Giménez Puentes, 2010). La urbanización es un proceso tanto intrínseco al desarrollo como un dinamizador del crecimiento económico, el cual a su vez constituye una condición necesaria para el desenvolvimiento de una sociedad. En síntesis el proceso de urbanización debe ser entendido como causa y consecuencia de desarrollo.

Las ciudades se están involucrando cada día más en patrones comerciales a escala global, lo que termina implicando que la eficacia y eficiencia de su sistema de transporte urbano constituya un elemento crítico. Por lo tanto, resulta de importancia que las nuevas necesidades de movilizar personas y bienes sean contempladas por las autoridades encargadas de gestionar el sistema de transporte urbano. Sin embargo, este vertiginoso crecimiento de la población urbana, junto con las nuevas y acrecentadas necesidades

de movilizar personas, ha provocado el deterioro de la calidad medioambiental de la vida urbana, colocando en el centro del debate el análisis de la sustentabilidad del sistema de transporte de pasajeros (Bobbio, 2012).

En este contexto, la aplicación de métodos de optimización a la planificación del transporte 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. Esto se explica por la centralidad que dicha modalidad ha adquirido en los sistemas de transporte de aquellos países que han decidido alterar el equilibrio intermodal (i.e.- las decisiones de los pasajeros de optar por determinado medio para satisfacer necesidades de movilidad), en pos de la utilización de transporte público y la sustentabilidad del sistema de transporte.

Consecuentemente, el estudio de las estrategias adoptadas en sistemas de transporte ferroviario de algunos países europeos, que mantienen una extensa tradición en la inclusión de métodos analíticos que sustenten las decisiones de las autoridades administrativas, se presenta indispensable para la extracción de experiencias y lecciones susceptibles de ser aplicadas a los problemas de movilidad de las urbes latinoamericanas, especialmente del AMBA.

El presente trabajo pretende indagar en los fundamentos del problema que enfrentan las autoridades administrativas de una red ferroviaria para asignación de un cronograma óptimo de partidas y llegadas, de forma tal de resolver los conflictos que se suscitan cuando dos o más trenes se disponen a utilizar simultáneamente el mismo tramo de la red ferroviaria, considerando la demanda, los niveles de seguridad y los efectos de dicho resultado sobre la administración de la totalidad de la red. Así, se procederá a la especificación de las variables, restricciones y objetivos que entran en la consideración en lo que constituye el Problema de Programación de Eventos Periódicos (PESP, por sus siglas en inglés).

A su vez, vale la pena aclarar que esta primera aproximación intentará circunscribir su objeto de análisis en el transporte ferroviario de pasajeros, sin indagar más allá de la integración de dicha modalidad al conjunto del sistema de transporte de pasajeros en áreas metropolitanas. La multiplicidad de variables que entrarían en juego al avanzar en este último aspecto, tales como la capacidad de articulación de las diferentes jurisdicciones que se ven reunidas en torno a la responsabilidad de regulación de dicho sistema, si bien ampliaría el conjunto de restricciones, a la vez complejizaría el análisis sin realizar un aporte sustantivo al objetivo rector del trabajo, i.e.-indagar en la aplicabilidad de métodos de optimización en la administración y regulación de transporte ferroviario de pasajeros.

En una primera etapa de análisis (Sección 2), se presentará una descripción de la situación actual del sistema de transporte ferroviario de pasajeros del AMBA. De dicha caracterización se desprenderá la necesidad de un replanteamiento en la organización del servicio para lo cual el método de Planeamiento de Sistema Ferroviario, en términos generales, y de la optimización de la programación del servicio, en términos específicos, se presentan como herramientas capaces de modificar la situación descripta.

Seguidamente (Sección 3) se procederá a presentar una aproximación a los fundamentos del Problema de Programación de Eventos Periódicos (PESP por sus siglas en inglés) como así también diferentes criterios de optimización de programación ferroviaria, cuya relevancia será determinada por el encuadre o marco regulatorio imperante en los sistemas de transporte ferroviario.

Finalmente (en la Sección 4) se esbozan las conclusiones del trabajo así como los lineamientos a profundizar.

Sección 2: Situación actual del sistema de Transporte Ferroviario del AMBA

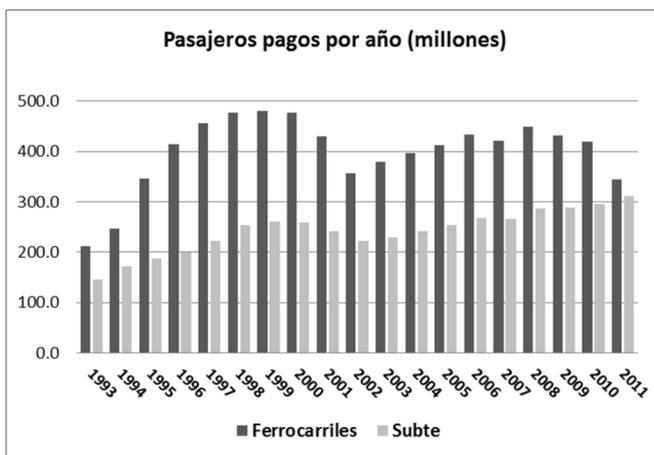
La descripción del Sistema Ferroviario de Pasajeros del AMBA debe comenzar con una breve especificación del espacio geográfico en el que se encuentra inmerso. El AMBA consta de 24 municipios de la Provincia de Buenos Aires y la Capital Federal, en lo que constituye un territorio que, según el último Censo Nacional 2010, reúne a más de 13 millones de individuos. La complejidad de desarrollo urbanístico en este escenario se resume en la problemática de una tendencia a la dispersión y discontinuidad respecto del entramado urbano consolidado, a lo que se le suma la existencia de una multiplicidad de marcos regulatorios y jurisdicciones que conforman el encuadramiento legal de dicho proceso.

Así, el actual equilibrio intermodal del AMBA puede desglosarse en un 51% representado por transporte individual, un 40% por transporte colectivo, i.e.-autotransporte, el tren suburbano, el metro y el tranvía, y el 9% restante por transporte a pie (Observatorio de Movilidad Urbana. CAF, 2011). Evidenciando uno de los equilibrios con la menor participación del transporte público de América Latina (Foro de Discusión sobre el FC Suburbano, 2013).

En cuanto a la Red de Ferrocarriles de pasajeros del AMBA, ésta consta de 814 km sobre los cuales se llevan a cabo en promedio, aproximadamente, 930.000 viajes diarios de los 26 millones de viajes que, en promedio anual, se realizan en el AMBA (la cifra de viajes diarios en promedio se encuentra subestimada debido a la alta tasa de evasión, una de las más altas de la región). Otro rasgo distintivo de la red ferroviaria de pasajeros del AMBA se refiere a la escasa integración tanto de infraestructura como de logística con el resto de las modalidades del sistema de transporte metropolitano. Esto último constituye un impedimento central en la optimización del desempeño del sistema.

De este marco se desprende que, mientras la cantidad de viajes del sistema de transporte en el AMBA ha ido creciendo a la par de la demanda (como una tendencia inherente al proceso de urbanización) la cantidad de viajes anuales realizados por el Sistema Ferroviario de Pasajeros del AMBA ha ido perdiendo participación relativa frente a otras modalidades de transporte. El hecho de no haber restablecido los niveles de pasajeros pagos por año alcanzados en 1999 (el máximo del decenio 1990-2000, ver gráfico) refiere a una situación sub-óptima del desempeño del sistema de transporte de pasajeros.

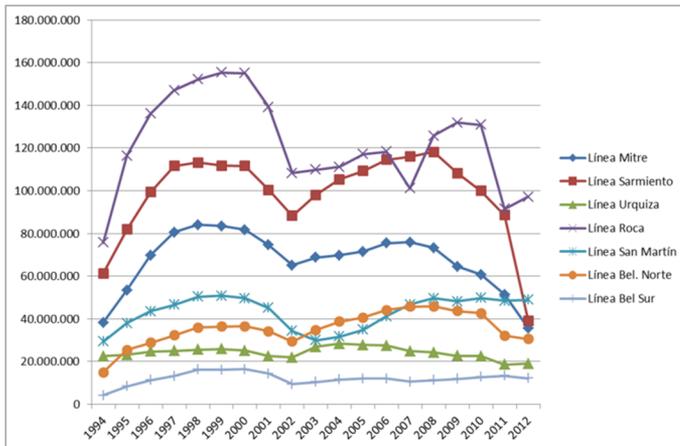
Gráfico 1. Pasajeros pagos por año (millones)



Fuente: Comisión Nacional de la Regulación de Transporte, CNRT (2011).

Un análisis gráfico detallado de la distribución de los pasajeros pagos por año en las líneas operativas en la red ferroviaria del AMBA se presenta a continuación.

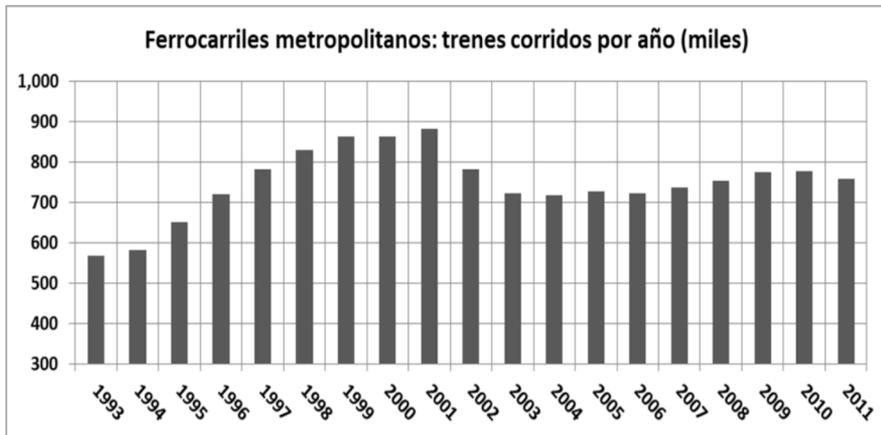
Gráfico 2. Distribución de los pasajeros pagos por año



Fuente: CNRT (2012).

En lo que respecta a la oferta del servicio de transporte ferroviario del AMBA no se observa una recuperación que permita alcanzar los niveles máximos de la década de 1990. El aumento gradual de trenes corridos lo han observado los pasajeros de las líneas, Belgrano Norte, Belgrano Sur, San Martín y Roca. Sin embargo, los líneas Mitre y Sarmiento tuvieron francos retrocesos desde 2008, tendencia que se termina de consolidar a partir de la Tragedia de Once, luego de que se retirara parte del material rodante y se restringiera el servicio de esta última línea. Esto último termina por afectar el tenue crecimiento que evidenció la oferta, quebrando la estabilidad que comenzó en 2002.

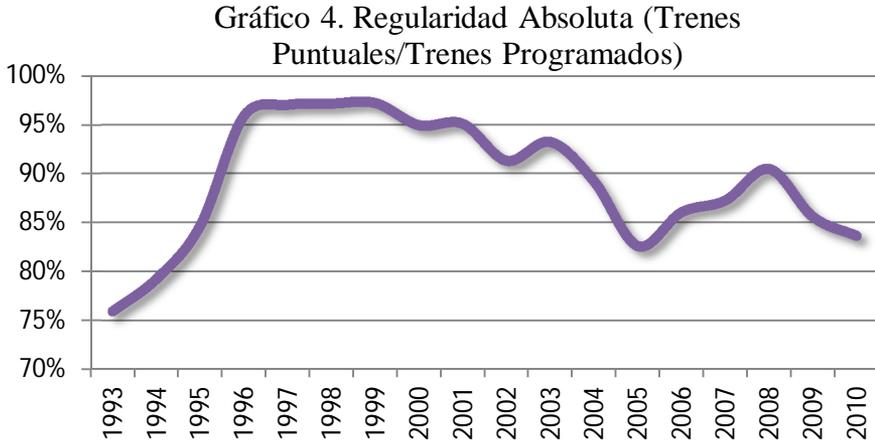
Gráfico 3



Fuente: CNRT, 2011.

La calidad del servicio tampoco responde a la creciente demanda de movilidad. Indicadores como la puntualidad absoluta, i.e.- la proporción de trenes puntuales sobre el total de trenes programados, a lo largo de las últimas dos décadas habla de la imposibilidad de mejorar las estadísticas en esta dimensión. Este indicador constituye un elemento esencial en el proceso de planeamiento del sistema ferroviario de pasajeros puesto que refiere al cumplimiento de la programación y las dificultades de articulación de las líneas, así como de los diferentes modos de transporte, que se derivan de las salidas demoradas del material rodante. La optimización de la programación, en tanto un eslabón del proceso de planeamiento que permite tener en cuenta la articulación intermodal del sistema de transporte a los efectos de otorgar celeridad y previsibilidad al transporte colectivo como herramienta de fomento, otorga un benchmark, i.e.- un elemento óptimo comparativo al que está referida la asignación de movilidad. En el siguiente gráfico se observa el comportamiento de esta proporción, dando cuenta de la necesidad de un replanteamiento frente a

la obtención de niveles de desempeños que retrotraen a la situación de 1994-1995.



Fuente: CNRT, 2011.

En síntesis, se ha intentado presentar una escueta descripción de la situación actual del sistema de transporte ferroviario de pasajeros del AMBA. De la misma, se deduce la necesidad de centrar la atención en profundizar prácticas de planeamiento en el sistema de transporte interurbano a los efectos de revertir la tendencia de creciente desbalance modal en favor del transporte individual sus efectos en términos de movilidad sustentable, e.i.- satisfacer las crecientes necesidades de movilidad inherentes al proceso de urbanización sin que ello implique un perjuicio a la calidad de vida de las generaciones presentes y futuras (Pereira Dos Santos Carvalho, 2010).

En este sentido, vale la pena rescatar alguna de las principales conclusiones arrojadas por el Foro de Discusión sobre el FC Suburbano 2013.

"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).

Haciéndose eco de esta idea, es posible sostener que el Planeamiento Jerárquico del Sistema de Transporte constituye una herramienta fundamental para un abordaje integral. Este procedimiento parte de la caracterización del conjunto de las demandas de movilidad, planteando las distintas modalidades de transporte como partes constitutivas de un sistema, facilitando a los operadores y reguladores el abordaje de políticas que permitan alterar el equilibrio resultante.

Sección 3: Fundamentos del Problema de Programación de Eventos Periódicos (PESP)

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 significaba la unificación alemana a comienzos del decenio de 1990.

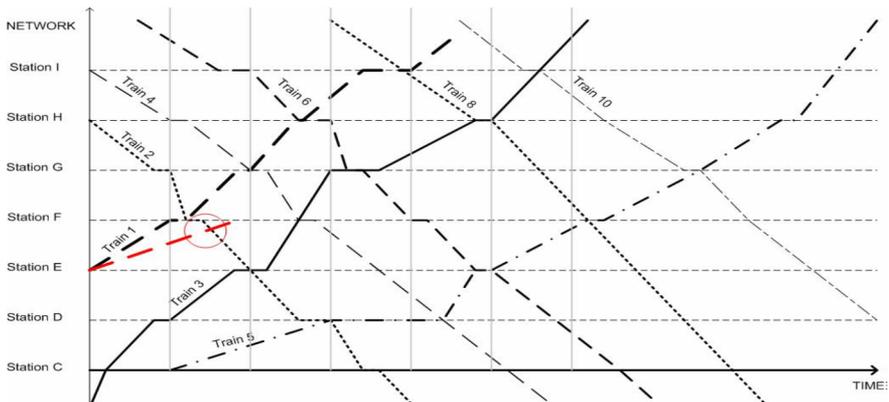
Los autores mencionados anteriormente entienden que la programación del sistema ferroviario de pasajeros constituye la columna vertebral del proceso de planificación. En síntesis, la programación consiste en la especificación de los tiempos de llegada y partida de las líneas a ciertos puntos de la red ferroviaria, i.e.-el entramado ferroviario o infraestructura ya instalada.

Adicionalmente, es posible distinguir entre una programación periódica o de intervalos fijos y aquellas cuyos cronogramas no se repiten sino que cambian sucesivamente.

En las grandes áreas metropolitanas, la programación periódica del transporte público, sin distinción de la modalidad, constituyen una herramienta fundamental para disminuir la congestión urbana, ya que facilita el uso del transporte público al otorgarle previsibilidad y ordenamiento en torno a los cuales los individuos determinan su conducta.

Autores como Törnquist (2005) ejemplifican el problema de programación como aquel en que dos a más trenes deben ocupar simultáneamente el mismo tramo de la red ferroviaria, ya sea en la misma dirección o direcciones opuestas. La asignación de líneas suele ser tal que cada una mantiene un tren en dicho recorrido por un período de tiempo, satisfaciendo con normas de seguridad. Sin embargo, el problema surge cuando trenes de diferentes líneas se aproximan en sus respectivos recorridos. Dicho conflicto debe ser resuelto tomando en consideración los impactos circundantes en el tráfico en dicho período, es decir, la resolución debe contemplar el carácter interdependiente de los conflictos que se despliegan a lo largo de una red.

Figura 1



Fuente: Törnquist, J. (2005)

La figura 1 representa un diagrama de espacio-tiempo, donde para un particular recorrido o línea de la red, todos los trenes de ese servicio se encuentran representados. En esta representación se observa una ilustración del problema planteado por Törnquist para una línea ferroviaria con un único carril bi-direccional. En ella el conflicto aparece cuando el tren 1 no sale a tiempo de la estación E. Debido a que la programación del tren 1 mantiene interfaces con el tren 2, este último también se demora como aquellos con los que también mantiene la restricción de no utilización simultánea del mismo tramo. Así, el tren 2 debe esperar al tren 1, lo que causa potenciales conflictos también con el tren 3 y el 4.

Adentrándose ya en la modelización y siguiendo a Lindner (2000), en primera instancia se definirán los términos que se usarán en el modelo:

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; y E es el conjunto de bordes, haciendo referencia a las redes de ferrocarril o las vías, $(v_i, v_{i+1}) \in E$ para cualquier $i \in \{1, \dots, n - 1\}$)

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 tiempos asociados a las diferentes líneas, se trabajará con un mínimo común múltiplo.

El conjunto de Líneas se simbolizará con R , es relevante notar que los elementos de R son vectores que pueden tener diferentes dimensiones.

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.

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:

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

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 explicitarán las distintas restricciones temporales que se deben 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 de 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:

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

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 esta 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 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.

2. El Problema de programación de eventos periódicos (PESP)

Serafini y Ukovich (1989) definieron el Problema de Programación de Eventos Periódicos (en adelante PESP) en los siguientes términos:

Datos:

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.

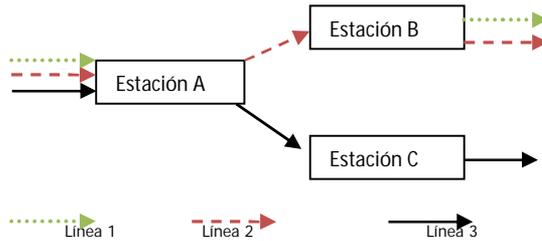
$\mathcal{G} = (V_{\mathcal{G}}, A_{\mathcal{G}})$ se encuentra definida de la siguiente manera:

Para cada $e \in E$ es el nodo $v_e \in V_{\mathcal{G}}$

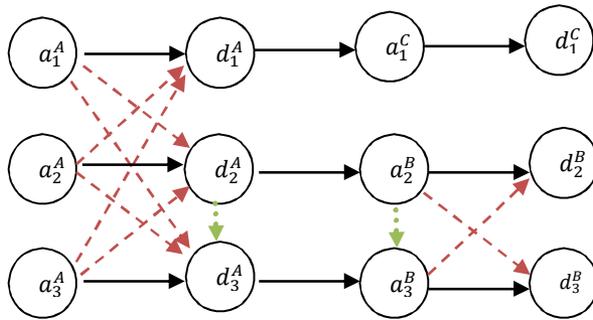
Para cada $(e, e', l, u) \in C$. Esto es un arco que va desde v_e a $v_{e'}$ con el correspondiente intervalo periódico $[l; u]_T$

Siguiendo la presentación realizada por Lindner (2000) la siguiente figura sirve a los efectos de esclarecer la noción de Red Ferroviaria como de Evento Grafo.

Figura 2. Red Ferroviaria



Grafos de Eventos



—▶ Tiempo de Espera / tiempo de viaje.

- - -▶ Tiempo de cambio de tren.

.....▶ Tiempo de avance.

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:

$$\left\{ \begin{array}{l} l \leq \pi(\hat{e}) - \pi(e) - z_c \cdot T \leq u, \text{ para cada } c = (e, \hat{e}, l, u) \in C \\ \pi(e) \in R \text{ para cada } e \in E \\ z_c \in Z \text{ para cada } c \in C \end{array} \right. \quad (8)$$

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:

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

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.

$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{\pi}(a_{l_1}^{v'(0)}) = \hat{\pi}(d_{l_1}^{v(0)}) + t_1 \\ \hat{\pi}(a_{l_2}^{v(0)}) = \hat{\pi}(d_{l_2}^{v'(0)}) + t_2 \end{array} \right.$$

Entonces: $\hat{\pi}(d_{l_1}^{v(0)}) + t_1 \leq \hat{\pi}(d_{l_2}^{v'(0)}) - z \cdot T \leq \hat{\pi}(a_{l_1}^{v'(0)}) + T - t_2$

Una de las desventajas del modelo analizado hasta acá es que solamente considera la situación de factibilidad. En la práctica pueden suceder situaciones que provoquen la infactibilidad del problema, por lo que habría que relajar alguna restricción, no todas. En cada situación concreta hay que

analizar cuáles conviene relajar en función de las ventajas que se pueden obtener. Otra desventaja del modelo es que nunca se tiene la seguridad que el horario encontrado es el mejor.

3. El problema de programación de eventos periódicos con nuevas restricciones (PESP)

Datos:

T: período de Tiempo, o Frecuencia

E: Conjunto de eventos periódicos.

C: Conjunto de Restricciones de intervalos periódicos para E

$J \subseteq C \times C$: conjunto de restricciones agregadas

Encontrar: $\pi: E \rightarrow R$ una función que describa el cronograma de los horarios del tren tal que:

- Las restricciones de tiempo de viaje, de espera y de regreso se cumplan con $z=0$.
- Todas las otras restricciones de C se cumplan para cualquier valor arbitrario de $z \in Z$.
- $(c_1, c_2) \in J \Rightarrow z_{c_1} = z_{c_2}$

De lo contrario es infactible el problema.

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, ésta 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 $c \in C$, 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:

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

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 frecuentemente. En esta 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 siempre y cuando se garantice el avance requerido.
- *Maximización del Beneficio/ Minimización de los Costos:* en este 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 en 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.

- *Minimización de periodos:* 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 válido 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. Los métodos de optimización que consideran la multiplicidad de criterios pueden ser suma ponderada de objetivos, restricciones para algunos objetivos así como soluciones de Pareto óptimo.

De acuerdo a los distintos grados de intervención estatal mediante la especificación en un marco regulatorio, la ponderación de un criterio respecto de otro será mayor dependiendo de las realidades en las que esté inserto el sistema ferroviario de pasajeros. Tal y como lo plantea Baron (1995) "Because 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).

4. Conclusiones

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 con las definiciones imperantes de movilidad sustentable (Bobbio, 2012; Pereira Dos Santos Carvalho, 2010).

En este marco, del análisis del sistema ferroviario de pasajeros esbozado en la segunda sección se desprende la conclusión de una relativa estabilidad en diferentes dimensiones (promedio anual de pasajeros pagos diarios transportados, trenes corridos por año, regularidad absoluta) que hacen a la prestación del servicio, dando cuenta de una situación similar a la observada en el año 2002. Los rasgos críticos se presentan fundamentalmente en la regularidad absoluta donde se observa niveles que retrotraen la situación a 1995.

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 Planeamiento Jerárquico del Sistema Ferroviario constituye una herramienta que bien puede ofrecer soluciones a los puntos críticos identificados por el Foro de Discusión sobre el Ferrocarril Suburbano 2013.

Frente a esto, existe consenso en identificar al Planeamiento de la Programación como la columna vertebral de la propuesta. Así, el trabajo pretendió presentar una primera aproximación al Problema de Programación de Eventos Periódicos (PESP), en tanto la base de los Modelos de Optimización de Programación, describiendo sus fundamentos sin ahondar en todas las especificidades del problema asociadas a las particularidades de cada sistema de transporte ferroviario.

En este sentido es de destacar la definición del PSEP como síntesis de los fundamentos del problema. En ella se reúnen tanto las variables exógenas, i.e. el periodo de tiempo (que se supone homogéneo para todas las líneas), el set de eventos periódicos y el set de restricciones de intervalos periódicos, y aquellas que mantienen un carácter endógeno como la periodicidad de eventos que cumple con todas las restricciones.

Esta especificación, a su vez, permite alcanzar un nivel de abstracción tal que el PESP pueda adaptarse a los diferentes criterios de optimización de la programación de acuerdo a las complejas realidades que se suscitan en torno a las políticas de transporte, tal y como lo explicita Baron (1995).

De esta forma, emerge el desafío de un acabado estudio que permita avanzar en dos direcciones. Por un lado, modelizar el conjunto de restricciones que den cuenta de las especificidades inherentes a la realidad del sistema ferroviario de pasajeros en el AMBA. Por otro, identificar, a través del estudio del marco regulatorio en el que se encuadra el servicio, los criterios de optimización de la programación.

Habiendo avanzado en aquellas direcciones, la resolución del modelo permitiría cotejar los programas asignados a cada línea con los resultados

arribados en la optimización. Este análisis, constituiría un aporte sustantivo al sistema ferroviario de pasajeros en el AMBA, puesto que permitiría determinar el grado de eficacia de la programación ferroviaria.

Referencias bibliográficas

Baron, P. (1995). *Transportation in Germany: A Historical Overview*. Transportation Research 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, 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).

Cooperación Andina De Fomento (2011). *Desarrollo Urbano y Movilidad en América Latina*. Panamá.

FORO DE DISCUSIÓN SOBRE EL FC SUBURBANO UNSAM – itf (2013) *Una estrategia para la rehabilitación de ferrocarriles metropolitanos de Buenos Aires*.

Giménez Puentes, P. (2010). *Políticas de regulación del transporte urbano de pasajeros con fines de inclusión*, Tesina de grado de Licenciatura en Economía, Facultad de Ciencias Económicas, Universidad Nacional del Litoral.

Higgins, A.; Kozan, E.; 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 Economía e Gastão, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal.

Pérez, G.; 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.; Ukovich, W. (1989). *A mathematical model for fixed-time traffic control problem*, European J. Oper. Res. 42.