

# Inicio de la optimización del sistema de transporte ferroviario en el AMBA

Starting to optimize the railway transport system at AMBA

**María Magdalena Mas**

*Facultad de Ciencias Económicas*

*Universidad Nacional del Litoral, Argentina*

*E-mail: mmmas@fce.unl.edu.ar*

Fecha de recepción: 14/03/2016

Fecha de aceptación: 24/05/2016

**Palabras clave**

- *transporte ferroviario*
  - *optimización*
  - *modelos*
  - *AMBA*

## Resumen

Este trabajo intenta indagar en primer lugar sobre las ventajas del sistema de transporte ferroviario urbano de pasajeros desde distintas perspectivas. En segundo lugar se revisa el estado actual del mismo en el Área Metropolitana de Buenos Aires (AMBA). En la sección siguiente se presentan algunos modelos propuestos para el servicio ferroviario europeo. Luego se intenta hacer una transferencia de los modelos descritos al AMBA y por último se enuncian algunas conclusiones.

## Summary

At first, this work tries to make a search into the advantages of the passenger urban Railway Transport System from different perspectives.

On second place, the current state of this system in the Metropolitan Area of Buenos Aires (AMBA) is checked.

In the following section there are some models suggested for the European railway service.

After this, transference to the AMBA of the previously described models is intended and, finally, several conclusions are presented.

**Palabras clave**

- *railway transport*
  - *optimization*
  - *models*
  - *AMBA*

## 1. Introducción

Este trabajo trata sobre el sistema de transporte ferroviario urbano de pasajeros; destaca su importancia, en primer lugar, y en segundo lugar se revisa el estado del mismo en el Área Metropolitana de Buenos Aires (AMBA). Luego presenta algunas propuestas publicadas para el servicio europeo de tal modo de intentar hacer una transferencia al AMBA. Para finalizar se enuncian algunas conclusiones.

En la mayoría de los países, el sistema de tráfico ferroviario es una parte significativa de la columna vertebral del sistema de transporte ya que es un importante proveedor de servicios para el transporte de pasajeros y de cargas. Las políticas, en general, están intentando aumentar el uso de trenes cuando sea apropiado para disminuir el uso de las carreteras. Al mismo tiempo, los sistemas ferroviarios disponibles en parte están sobresaturados en los principales enlaces, generándose una importante congestión.

Por sus características, el sistema ferroviario es un instrumento con atributos únicos para estructurar un sistema de movilidad sostenible que contribuya a la inclusión social, el ordenamiento territorial, la calidad ambiental, la seguridad energética, la mejora de la competitividad y la calidad de vida de los ciudadanos. Los ferrocarriles deben concebirse como parte de ese sistema de transporte público, integrado en términos físicos, operativos y tarifarios, con mayor capacidad, calidad y seguridad del servicio.

Por otro lado, actualmente, 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 % (Pérez Salas y Sánchez, 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.

«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, las autoridades encargadas de gestionar el sistema de transporte urbano deberán tener en cuenta las nuevas necesidades de movilizar personas y bienes. 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 ambiental de la vida urbana, colocando en el centro del debate el análisis de la sustentabilidad del sistema de transporte de pasajeros». (Bobbio, 2012:32)

La relación del sector transporte con la agenda del cambio climático hace necesario un cambio de paradigma que lo vuelva consistente con el desarrollo sostenible en sus tres dimensiones básicas: social, ambiental y económica–financiera.

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 (es decir, 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.

Por lo tanto, una cuestión importante es analizar de qué forma se pueden optimizar los recursos disponibles y, al mismo tiempo, garantizar la sustentabilidad. La programación del tráfico ferroviario se considera a menudo un problema difícil debido principalmente a su complejidad en cuanto a tamaño y las interdependencias significativas entre los trenes (Alvarez y Mas, 2015).

El objetivo de la estrategia que ha adoptado Argentina es impulsar una mayor utilización del ferrocarril en sus distintos modos de actuación

(urbano, interurbano, regional, de pasajeros y de cargas), de manera de capturar flujos actuales y futuros de personas y bienes del transporte automotor. Si bien el objetivo propuesto apunta a la rehabilitación generalizada del modo ferroviario, la estrategia se expresa a través de líneas de acción específicas para cada uno de sus tres segmentos básicos de actividad: Servicios Metropolitanos de pasajeros, Servicios interurbanos de pasajeros y Servicios de transporte interurbano de cargas.

Por otra parte, la gestión de la organización del tráfico ferroviario difiere entre países. En algunos, el operador y gestor de tráfico son la misma empresa, mientras que en otros, como por ejemplo en algunos países de Europa, el mercado ferroviario está parcial o totalmente desregulado con una autoridad específica que controla la infraestructura y la gestión del tráfico, y varios operadores privatizados que compiten utilizando las vías. En la Argentina el sistema es mixto, algunas líneas están concesionadas y otras son operadas por cuenta y orden del estado.

## 2. Situación actual en el Área Metropolitana de Buenos Aires

El sistema de transporte ferroviario de pasajeros en el Área Metropolitana de Buenos Aires está compuesto por una extensa red conformada por siete líneas de trenes suburbanos, seis líneas de subterráneos y

tres líneas de tren ligero que sirven al área del Gran Buenos Aires. Este conjunto opera sobre unos 815 km de vías, de los cuales 213 km están electrificados y el resto presta servicios de tracción diesel.

Alrededor de 1000 millones de pasajeros utilizan anualmente el servicio ferroviario, que cuenta con un total de 305 estaciones. La red ferroviaria de Buenos Aires y su área metropolitana pueden considerarse como las mayores redes de trenes metropolitanos del mundo.

Los ferrocarriles suburbanos son los llamados ferrocarriles metropolitanos, estos parten desde la Ciudad Autónoma de Buenos Aires hacia la conurbación del Gran Buenos Aires.

Existen seis nodos ferroviarios desde donde operan las distintas líneas:

- Retiro, desde donde parten las líneas Mitre, Belgrano Norte y San Martín. El nodo se divide en tres estaciones terminales contiguas.
- Constitución, desde donde parte la línea General Roca.
- Once, desde donde parte la línea Sarmiento.
- Lacroze, desde donde parte la línea Urquiza.
- Buenos Aires y Puente Alsina, desde donde parten los ramales de la línea Belgrano Sur.

En este trabajo se consideran fundamentalmente las líneas Sarmiento, Roca y Mitre por la influencia que tienen en el servicio en general, como se presenta en la siguiente tabla.

**Tabla 1.** Características técnicas del sistema de transporte ferroviario de pasajeros en el AMBA

LÍNEA	KM DE RED	CANTIDAD DE ESTACIONES	CANTIDAD DE FORMACIONES	CANT. DE SERVICIOS DIARIOS
Sarmiento	160	40	31	268
Roca	449	69	59	724
Mitre	185	58	38	368
San Martín	70	22	24	182
Belgrano Norte	54	22		90
Belgrano Sur	66.3	30	16	171
Urquiza	26	23	14	85

Fuente: *Elaboración propia en base a OFSE (2015), Línea Belgrano Norte (s.f.), Tren Belgrano Norte (s.f.) y Línea Urquiza (s.f.).*

El actual equilibrio intermodal del AMBA «puede desglosarse en un 51 % representado por transporte individual, un 40 % por transporte colectivo, es decir autotransporte, el tren suburbano, el metro y el tranvía, y el 9 % restante por transporte a pie (CAF, 2011). Evidenciando uno de los equilibrios con la menor participación del transporte público de América Latina» (UNSAM–ITF, 2013).

La cantidad real de los pasajeros transportados por ferrocarril es indeterminada debido al alto grado de evasión existente. Si bien las estadísticas oficiales dan cuenta de un decrecimiento desde los cerca de 500 millones/año en 1999 a menos de 350 millones en 2015, como se muestra en la Tabla N° 2, el 48 % de los 3 millones de personas que ingresan diariamente a la CABA (Ciudad Autónoma de Buenos Aires) provenientes de la provincia utilizan el sistema ferroviario.

La Universidad de San Martín publicó un documento, «Una estrategia para la rehabilitación de los ferrocarriles metropolitanos de Buenos Aires» (UNSAM–ITF, 2013), como un aporte al Estado Nacional para la mejora del sistema de transporte metropolitano.

En primer lugar, elabora un diagnóstico de la situación actual, con perspectiva histórica, teniendo en cuenta las principales evidencias que presenta la información disponible en materia de operación ferroviaria, y la delicada situación del sistema y la necesidad de introducir modificaciones y mejoras. En la segunda sección se revisan las principales

tendencias y procesos que se desarrollan en el territorio del Área Metropolitana de Buenos Aires, y se realiza un análisis de las fortalezas, debilidades, amenazas y oportunidades (FODA) del sistema.

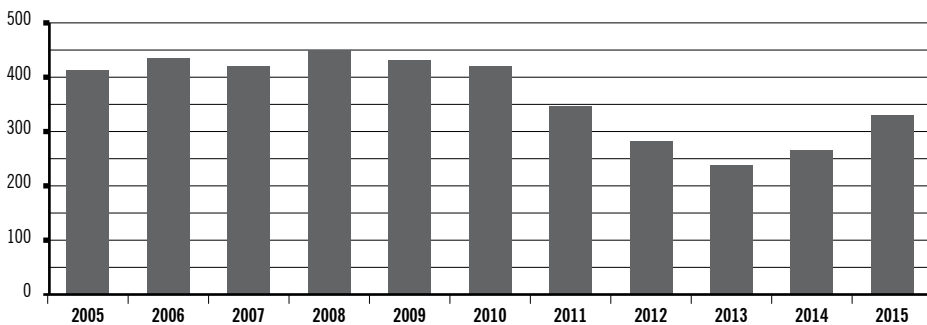
### Fortalezas principales

- La red ferroviaria heredada es muy extendida y genera una buena estructura troncal en los corredores de transporte.
- Existe una amplia infraestructura previa de terminales, estaciones y tierras disponibles, que si bien requiere de adecuaciones e inversiones, forma una base muy relevante para cualquier mejora.

### Debilidades más importantes

- La trama ferroviaria ofrece limitaciones para una movilidad más fluida debido a la existencia de muchos Pasos a Nivel (PaN).
- Presenta un considerable atraso tecnológico en el material rodante, en las instalaciones fijas y en el sistema de señalamiento.
- No existe homogeneidad en las características de las distintas líneas y aun dentro de la misma línea.
- Existen dificultades para la integración física y operativa con otros modos de transporte.
- La capacidad de transporte está debilitada por el deterioro de la infraestructura, por las insuficiencias en la segregación de modos y por la carencia de material rodante.

Tabla 2: Cantidad total de pasajeros pagos



Fuente: CNRT, 2016.

- El servicio actual tiene mala reputación generada fundamentalmente por su insuficiente regularidad, seguridad y calidad.
- Debilidad institucional y falta de cooperación entre jurisdicciones.
- Mano de obra desalentada e insuficientemente capacitada.

### **Oportunidades**

- El potencial de demanda desatendida es muy significativo y se concentra en los distintos cordones del AMBA, en especial, en el primer cordón.
- Existe una experiencia previa en el inicio del sistema de concesiones durante la segunda mitad de los años 90, cuando la cantidad de pasajeros pagos se duplicó en pocos años, lo cual revela el potencial de crecimiento que el sistema tiene.
- Ha avanzado de manera creciente el nivel de saturación de la vialidad urbana y suburbana.
- Se ha diseminado la idea de que el país necesita realizar inversiones significativas en infraestructura (transporte de pasajeros y cargas, carreteras, energía, puertos) para garantizar la continuidad del proceso de crecimiento y mejora de la calidad de vida de la población.

### **Amenazas**

- Marcada tendencia al aumento en la tasa de motorización, con fuerte preferencia por el transporte particular, apoyado en las medidas de estímulo a la industria automotriz.
- Aparición de nuevos modos de transporte automotor (chárteres).
- La ocupación de vías y terrenos operativos para el ferrocarril.
- Los robos de material.
- Sacrificar de por vida capacidades operativas: cancelar la disponibilidad vía cuádruple con decisiones viales o de túneles, o de pérdida del derecho de paso por abandono.
- La pérdida de capital humano sin generación de un recambio.

Como resultado, se concluye que el modelo actual de movilidad urbana (alta motorización, expansión urbana, concentración de empleos en el centro) no resulta sostenible, por lo que es trascendental mejorar el sistema ferroviario (UNSAM–ITF, 2013).

Es importante mencionar como una dimensión significativa el origen geográfico de la demanda. Ésta ha ido variando sustancialmente en las últimas décadas. Hace 50 ó 60 años la demanda se concentraba en los límites de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (CABA) y en el primer cordón del conurbano bonaerense. Actualmente, el ferrocarril atiende una demanda que se encuentra en mayores proporciones en el segundo cordón.

La calidad del servicio puede ser expresada mediante el análisis de indicadores tales como la proporción de trenes puntuales respecto de los programados, la configuración de la formación media, la frecuencia en hora pico que se relaciona con la demanda del servicio (las cuales expresan capacidad de transporte), la velocidad comercial media que se relaciona con el tiempo de viaje y otros factores como la percepción de seguridad, la calidad de los lugares de espera, el tiempo de espera, el confort de los vagones, la información sobre las condiciones del servicio y las condiciones de combinación.

Con respecto a la proporción de trenes puntuales en relación con los programados, el promedio general mostró en el año 2014 un nivel bastante bajo del 69.76 % (CNRT, 2014a) dado que el valor deseable para este indicador en el sistema es no menos del 95 %.

En lo que se refiere a la frecuencia en hora pico, la misma aumenta levemente, la diferencia de frecuencias depende de la línea. Por ejemplo, en la línea Roca la frecuencia varía de 14 minutos a 12 minutos; en la línea Mitre tiene una amplitud mayor en una misma franja horaria, la frecuencia varía de 5 minutos a 19 minutos; la línea Sarmiento varía según la franja horaria de 10 minutos a 12 minutos (OFSE, 2014).

Los datos oficiales sobre la demanda del servicio no están diferenciados por horarios, por días o por paradas, lo único que figura como datos oficiales es la cantidad de boletos vendidos en total, por mes y por año, como se muestra en la Tabla N° 3.

Si se comparan estos datos con la cantidad total de asientos se podría deducir la satisfacción de la demanda. Este análisis sin embargo no es correcto porque la distribución de los boletos vendidos no es regular respecto del horario; en cambio, la cantidad total de asientos no varía según el horario, por lo tanto estos datos no son comparables.

La velocidad media comercial varía según la línea y según el tipo de tren, si es diésel o eléctrico, como se muestra en la Tabla N° 4. La velocidad de los trenes diésel es más regular, mientras que la de los trenes eléctricos es bastante irregular, y esta variación depende conjuntamente del estado de las vías como de la cantidad de paradas.

En el servicio ferroviario se ofrecen combinaciones respecto de otros tipos de transporte, por ejemplo con el subte, con el premetro y con el colectivo. Las redes ferroviarias están organizadas de tal manera que cada línea cubre una parte bien delimitada de la región.

Para estudiar los otros factores como la percepción de seguridad, la calidad de los lugares de espera, el confort de los vagones y la información

sobre las condiciones del servicio, se analizó la encuesta (CNRT, 2014b) que realizó la Comisión Nacional de Regulación de Transporte del Ministerio de Transporte de la Presidencia de la Nación sobre la opinión de los pasajeros del transporte ferroviario. Las preguntas formuladas se refirieron a aquellos aspectos de la prestación que se visualizan como más relevantes para el público. El relevamiento se realizó en estaciones de la red concesionada de ferrocarriles urbanos y suburbanos del AMBA, y alcanzó una muestra de 2247 casos. El relevamiento se desarrolló entre el 23 de junio y el 17 de octubre de 2014, en diferentes horarios; la cantidad de casos a relevar se calculó sobre la base de los pasajeros transportados por línea y la selección de lugares se realizó sobre la base de la cantidad de boletos vendidos en cada estación. Los datos más relevantes se muestran en la Tabla N° 5.

Una pequeña observación sobre la publicación de los datos de la encuesta: en la publicación oficial figuran los datos como están expresadas en la Tabla N° 5, se supone que las preguntas fueron hechas en sentido positivo, es decir que el 46.8 % de los encuestados considera que el estado de los trenes es buena, que el 53.8 % de los encuestados considera que la información al usuario es correcta.

En la encuesta había una pregunta final sobre cuál era el aspecto que consideraban prioritario

**Tabla 3.** Cantidad total de boletos vendidos y de asientos

AÑO 2014	LÍNEA SARMIENTO	LÍNEA MITRE	LÍNEA ROCA
Cantidad de boletos vendidos	39 599 411	18 526 675	115 036 484
Cantidad total de asientos	32 679 841	27 329 720	98 212 292

Fuente: CNRT, 2016.

**Tabla 4.** Velocidad media comercial

VELOCIDAD COMERCIAL EN KM/H	LÍNEA SARMIENTO	LÍNEA MITRE	LÍNEA ROCA
Trenes eléctricos	35.2	33	47.6
Trenes diésel	37.1	35	34.1

Fuente: CNRT, 2016.

**Tabla 5.** Encuesta de opinión a los usuarios

ATRIBUTOS DEL SERVICIO	PUNTUALIDAD Y FRECUENCIA	ESTADO DE LOS TRENES	INFORMACIÓN AL USUARIO	ESTADO DE LAS ESTACIONES	LIMPIEZA DE LAS ESTACIONES	SUFRÍO ILÍCITO
Año: 2014	34.9 %	46.8 %	53.8 %	59,3 %	57,3 %	22,3 %

Fuente: Encuesta de opinión a los usuarios del FFCC (CNRT, 2014b).

mejorar. Para ello se definieron 19 atributos que cubrieron la mayoría de las cualidades del servicio y se contempló que el encuestado diese un número de orden al aspecto mencionado. El 16 % del total de los encuestados que dieron respuesta eligió la seguridad, el 15 % la frecuencia y el ítem puntualidad obtuvo un equivalente al 14 %.

En esta sección se trató de describir la situación actual del sistema ferroviario urbano en el área metropolitana de Buenos Aires.

### 3. Propuestas de modelización del Sistema Ferroviario

Törnquist (2005) ofrece en su trabajo una visión general de las investigaciones hechas en la programación del transporte ferroviario, desde 1973 hasta el 2005. Comienza realizando una distinción entre la Programación Táctica, Programación Operativa y Re-Programación. Estos tres tipos de programación tienen en común el núcleo principal, pero hay diferencias significativas en cuanto a contexto, el marco temporal y los objetivos planteados. La Programación Táctica por lo general se refiere a la programación maestra, es decir, la programación de una red de tráfico, con un horizonte de tiempo amplio (a veces hasta un año, pero sobre la base del día a día); puede incluir tanto la elección de itinerarios y la asignación de franjas horarias, como la especificación del uso de una vía por parte de una línea de tren, por lo tanto el objetivo suele ser bastante complejo ya que debe reflejar la demanda de varias partes interesadas teniendo en cuenta la infraestructura existente.

En cambio, la Programación Operativa tiene un plazo menor de tiempo, se realiza cerca del tiempo de salida de los trenes, generalmente las rutas ya están asignadas pero puede haber modificaciones en los horarios.

La Re-Programación se inicia cuando surge alguna modificación de la planificación inicial y tiene como objetivo minimizar los retrasos generales. Es posible que cuando se realice la reprogramación no se tenga en cuenta los intereses de todas las partes que intervienen, y se va a tener que tomar la decisión de priorizar los mismos. En la práctica, la programación de táctica y la operativa se llevan a cabo a menudo usando una combinación de herramientas computacionales y la experiencia humana, mientras que para la reprogramación, el procedimiento dominante es a menudo la experiencia humana (Zwaneveld et ál., 1996; Kroon, Romeijn, y Zwaneveld, 1997; Carey y Carville, 2003).

Por otra parte Bussieck (1998) y Lindner (2000) plantean que 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 el Planeamiento Jerárquico del Transporte Ferroviario hay dos eslabones que pueden ser abordados por técnicas de Programación Lineal: 1) El planeamiento de líneas y 2) El planeamiento de la Programación Ferroviaria. Ambos problemas son planteados en términos de secuencialidad (Caprara, Fischetti y Toth, 2002).

El planeamiento de líneas consiste en la especificación de un recorrido o ruta, es decir, 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, es decir, 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, o sea, al número 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 procede 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.

En primer lugar se definen 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:

$$E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}, \text{ tal que } e_k = (v_i, v_{(i+1)}) \in E \text{ para cualquier } i \in \{1, \dots, n-1\}$$

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.

Luego una línea (ferroviaria de pasajeros), que se simboliza con  $r$ , está modelada por el vector  $(v_1, \dots, v_n)$  con  $v_i \in V$  para  $i \in \{1, \dots, n\}$ ,  $v_i \neq v_j$  si  $i \neq j$ , por lo tanto  $r=(v_1, \dots, v_n)$  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 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  $i=1, \dots, k$ .

El conjunto de líneas se simbolizará con  $L$ , es relevante notar que los elementos de  $L$  son vectores que pueden tener diferentes dimensiones (Even, 1979).

Un problema de Programación Matemática o de Optimización es un modelo matemático que describe una situación problemática en la cual se busca obtener un resultado óptimo. En dicho modelo hay una función escalar que maximizar o minimizar, llamada función objetivo, cuyas variables de decisión pueden estar sujetas a restricciones (condiciones) o no (Hillier y Lieberman, 2001). A continuación, solamente se analizará la formulación de los modelos de Optimización propuestos por Bussieck (1998), Bussieck, Winter y Zimmermann (1997) y Lindner (2000); la resolución de los mismos será en otra etapa, ya que exige conocimientos específicos que escapan a este trabajo.



### Fundamentos del problema de la Planificación de Líneas

Para el problema de Planificación de Línea, cuando se refiere a una línea en particular, se especifica además la frecuencia  $\varphi \in \mathbb{N}$ , que se define como 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  $e$  representará el camino o ruta que va de un nodo a otro. Para cada  $e$ , se introducen límites inferiores y superiores a partir de la regulación respectiva, estos límites se simbolizan:

$\underline{\text{lfr}}(e) \leq \overline{\text{lfr}}(e)$ , que es el número de trenes en el intervalo de tiempo básico. Cuando se habla de planificación hay que respetar ciertas condiciones, que en la modelización se llaman restricciones, por lo tanto las restricciones que se pueden plantear en el modelo usando  $\underline{\text{lfr}}(e)$ ,  $\overline{\text{lfr}}(e)$  son:

- El límite inferior de frecuencia en el camino  $e$ , que satisface las regulaciones del mínimo avance  $h$ , es decir la distancia temporal entre dos trenes consecutivos, debe cumplir que:

$$\overline{\text{lfr}}(e) \leq \lceil \tau/h \rceil \tag{1}$$

- El plan de línea diseñado debe transportar a todos los pasajeros, la carga del tren en el camino  $e$  es  $\text{ld}(e)$ , que 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:

$$\overline{\text{lfr}}(e) \geq \lceil \text{ld}(e)/C \rceil \tag{2}$$

- Por una razón económica el número de asientos vacíos debe estar limitado superiormente (Claessens, Van Dijk, & Zwaneveld, 1998), por ejemplo un  $G\%$ , esto se puede expresar de la siguiente manera:

$$\overline{\text{lfr}}(e) \leq \left[ \left( 1 + \frac{G}{100} \right) \text{ld}(e) / C \right] \tag{3}$$

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

En el caso que haya un conjunto de líneas  $L$ , que cubren el mismo camino  $e$ , para que sea factible el plan de línea si y solo si, se debería cumplir:

$$\underline{\text{lfr}}(e) \leq \sum_{\substack{e \in E \\ (r, \phi) \in L}} \phi \leq \overline{\text{lfr}}(e) \tag{4}$$

para cada tramo  $e$  (Chen, 1994).

Generalizando un Plan de Línea Factible para las rutas en una red ferroviaria, como el conjunto de posibles rutas  $R$  es bastante pequeño, por lo tanto un modelo que incluye las rutas de forma explícita es de mucho interés, para lo cual, se introduce un vector entero  $\mathbf{x} \in \mathbb{N}^{|R|}$ , donde  $x_r$  representa la frecuencia de la línea utilizando la ruta  $r \in R$ . De acuerdo con esta representación particular de líneas, el conjunto de Plan de Línea Factible  $L$  puede ser descrito de la siguiente manera:

$$L = \{ \mathbf{x} \in \mathbb{N}^{|R|} : \underline{\text{lfr}}(e) \leq \sum_{\substack{r \in R \\ e \in E}} x_r \leq \overline{\text{lfr}}(e) \forall e \in E \} \tag{5}$$

Las ecuaciones o inecuaciones donde aparece la expresión:  $\sum_{\substack{r \in R \\ e \in E}} x_r$

se pueden representar a través de la Matriz de Incidencia de tramo y ruta,  $|E| \times |R|$ , simbolizada por  $M = (a_{er})$  donde:

$$a_{er} = \begin{cases} 1 & \text{si } e \in E \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{cases} \tag{6}$$

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

$$L = \{ \mathbf{x} \in \mathbb{N}^{|R|} : \underline{\text{lfr}}(e) \leq M\mathbf{x} \leq \overline{\text{lfr}}(e) \forall e \in E \} \tag{7}$$

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, etcétera.

**Fundamentos del problema de programación**

Comenzando con la modelización del problema de optimización de la programación, siguiendo a Lindner (2000), se definen nuevos términos que se necesitaran en el modelo.

Se asume que todas las líneas tienen el mismo período de tiempo entre dos trenes consecutivos:  $T \in \mathbb{N}$ . 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.

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

Se define la función  $\hat{\pi}$  como un horario o cronograma para un conjunto de eventos  $\hat{E}$ , siendo la misma:

$$\hat{\pi} : \hat{E} \rightarrow \mathbb{R} / \hat{\pi}(\hat{e})$$

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

$$E = \{e^{(i)} / i \in \mathbb{Z}\} \text{ tal que } \hat{\pi}(e^{(i)}) = \hat{\pi}(e^{(0)}) + Ti, \text{ donde } T \text{ es el período de tiempo entre dos trenes consecutivos.}$$

Para definir el horario de un evento periódico (llegada o salida de una línea), deben estar defi-

nidos los horarios de los eventos individuales (llegada o salida de un tren particular de dicha línea) y la frecuencia  $T$ .

Sea  $E^0 = \{e^{(0)} / e \in E\}$ , para asignar el horario a cada elemento del conjunto  $E$  de eventos periódicos, los elementos de fueron asignados previamente.

Se define la función como un horario para un conjunto de eventos periódicos  $E$ , siendo la misma:

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

Para eventos periódicos se va a usar la siguiente notación:

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

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

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

- 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:

$$\pi(a_{r,0}^{v'}) = \pi(a_{r,0}^v) + [l;u]_T \tag{8}$$

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.

- 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:

$$\pi(d_{r,0}^v) = \pi(a_{r,0}^v) + [l;u]_T \quad (9)$$

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.

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

$$\pi(a_{r,1}^{v_n}) = \pi(d_{r,0}^{v_n}) + [l;u]_T \quad (10)$$

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.

- 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:

$$\pi(d_{r_j, \mu_j}^v) = \pi(a_{r, \mu}^v) + [l;u]_T \quad (11)$$

El horario de salida de la estación  $v$ , por la línea  $r_j$  en la dirección  $\mu_j$  es igual al horario de llegada a la estación  $v$  por la línea  $r$  en la dirección  $\mu$  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.

- 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.

$$\Pi(d_{r_2, \mu}^v) = \pi(d_{r_1, \mu}^v) + [l;u]_T \quad (12)$$

$$\pi(a_{r_2, \mu}^v) = \pi(a_{r_1, \mu}^v) + [l;u]_T \quad (13)$$

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

El horario de llegada a la estación  $v'$  de la línea  $r_2$  en la dirección  $\mu$  es igual al horario de llegada a la estación  $v'$  de la línea  $r_1$ , en la dirección  $\mu$  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  $[l;u]_T$  presente en las distintas restricciones se encuentra determinado por el conjunto de líneas al que se arribó cuando se resolvió el Problema de Planificación de Líneas según el criterio de optimalidad que se haya establecido.

La programación operativa, que hacía referencia Törquinst (2005) puede estar determinada por diferentes criterios al momento de plantear la optimización de la programación del servicio, algunas de ellas pueden ser:

- 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  $c \in C$ , el número de pasajeros  $w_c$  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:

$$\sum_{(a_{1,u_1}^v, d_{1_2,u_2}^v, l, u) = c \in \bar{C}} \omega_c \cdot (\pi(d_{1_2,u_2}^v) - \pi(a_{1_2,u_2}^v)) - z_c \cdot T$$

Esta es una expresión lineal dentro del valor de  $\pi(e)$  y se puede agregar a la formulación del modelo con el fin de obtener un Problema de Programación Lineal Entero Mixto, (Savelsbergh, 1994).

- Maximización de la consistencia en el caso de la demora del tren: en la práctica la demora del tren ocurre con frecuencia. 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 éste caso hay varias ideas para estimar el beneficio/costo de la programación de trenes, resultando diferentes modelos de optimización en la programación.

Brännlund, Lidberg, Nöu y Nillsson (1998) desarrollaron un modelo de maximización de beneficio donde se plantea que el beneficio depende del horario que ciertos trenes pasan por ciertas partes de la red ferroviaria. En cambio, Carey (1994) consi-

dera 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, Kozan y Ferreira (1996) usa la suma ponderada de demora y de costos operativos del tren.

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.

Resulta válido afirmar que en los sistemas ferroviarios de pasajeros actuales, la optimización del servicio no se encuentra en función de un único criterio, sino que responderá a múltiples objetivos. Los métodos de optimización que consideran la multiplicidad de objetivos pueden plantear una única función objetivo, que se obtiene como una suma ponderada de los múltiples objetivos.

De acuerdo con 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 «porque no hay una clara perspectiva, la política de transporte y la planificación seguirá siendo un campo de juego de científicos, de grupo de presión, de los políticos, de gurús, de fanáticos y de ciudadanos preocupados por muchos años, y que mantendrá a generaciones de periodistas ocupados» (Baron, 1995:20).

#### 4. Transferencia de las propuestas al AMBA

El objetivo de esta sección es poder transferir lo analizado en la sección anterior al sistema ferroviario metropolitano de Buenos Aires, el AMBA.

Los conceptos desarrollados por Törquinst (2005) en el AMBA son: la Programación Táctica es la que se publica en la página oficial de Trenes Argentinos (OFSE, s.f.); la Programación Operativa fue publicada en la página citada anteriormente, hasta el

día 7 de marzo de 2016, donde había filas de color rojo que eran servicios suspendidos por realización de obras de mantenimiento. La Re-programación aparece en el momento como avisos en las estaciones propiamente dichas, en la radio y/o en la televisión, como: «Informe de Tránsito».

Siguiendo con el análisis hecho por Bussieck (1998) y Lindner (2000), una red ferroviaria en el caso del AMBA es por ejemplo la línea Mitre, donde el conjunto  $V$  es:

$V = \{\text{Retiro}; 3 \text{ de Febrero}; \text{Carranza}; \dots; \text{Bartolomé Mitre}\}$

Y los elementos son:  $v_1 = \text{Retiro}$ ,  $v_2 = 3 \text{ de Febrero}$  y así sucesivamente  $v_{10} = \text{Bartolomé Mitre}$ , y  $e_1 = (\text{Retiro}, 3 \text{ de Febrero})$

En el caso de ésta red ferroviaria en particular el conjunto  $E = \{e_1; \dots; e_{10}\}$

En la página oficial de Trenes Argentinos (OFSE, s.f.) se publican los horarios de las líneas Metropolitanas. Analizando dichos horarios de lunes a viernes, de las líneas más representativas, y tomando como un intervalo básico de 60 minutos, la frecuencia de la línea Mitre oscila entre 5 y 6 trenes, dependiendo de la franja horaria; la frecuencia de la línea Sarmiento es regularmente 6 y la de la línea Roca es generalmente de 3, aunque hay muy pocas franjas horarias de frecuencia 4.

Para el análisis del resto de las restricciones presentadas en el punto anterior, se considera solamente la línea Mitre del servicio desde la estación Retiro a la estación Bartolomé Mitre, para los días de lunes a viernes; de modo que sea más sencillo y más llevadero la lectura del trabajo. Después queda para el lector, si le interesa, hacer la transferencia de los conceptos a las otras líneas.

$\underline{\text{lfr}}(e) = 3$  y  $\overline{\text{lfr}}(e) = 7$  son los límites inferiores y superiores respectivamente, de la cantidad de trenes en el intervalo básico de 60 minutos y cumplen la restricción :

$$\underline{\text{lfr}}(e) \leq \overline{\text{lfr}}(e)$$

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

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

$$\overline{\text{lfr}}(e) \leq [\tau/h]$$

Si se toma como camino ir de la estación Retiro a la siguiente que es 3 de Febrero, siendo  $h = 5$  minutos, que es el menor valor de la distancia temporal entre dos trenes consecutivos, entonces se debe cumplir:

$$e \leq \frac{60}{5} = 12;$$

por lo tanto la línea Mitre cumple con esta restricción.

- En el plan de línea designado debe transportar a todos los pasajeros, la carga del tren en el camino  $e$ ,  $\text{ld}(e)$ , 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:

$$\overline{\text{lfr}}(e) \geq [\text{ld}(e)/C]$$

Para la evaluación de esta restricción se tienen en cuenta los datos publicados en la página oficial de la Comisión Nacional de Regulación de Transporte (CNRT, 2014a), que son cantidades totales de boletos vendidos por estación y parada, todos llevados a boletos de ida anual, sin distinguir franja horaria, estación inicial ni estación final, y como capacidad del tren se considera la cantidad total de asientos por coche, sabiendo que no es la capacidad real ya que el mismo posee pasa manos, que permite y habilita que haya pasajeros de pie.

Hechas las aclaraciones correspondientes  $\text{ld}(e) = 1.791.817$  y  $C = 2.428.157$  esta restricción queda:

$\overline{\text{Ifr}(e)} \geq [\text{Id}(e)/C]$ , es decir:

$$3 \geq \left[ \frac{1.791.817}{2.428.157} \right] \cong 0,74,$$

por lo tanto la línea Mitre cumpliría con esta restricción. Se pone en potencial porque si se compara con la realidad se sabrá que no siempre se cumple, ya que hay horarios donde los pasajeros van muy apretados o no pueden subir porque no hay lugar. El error de cálculo se comete por la falta de precisión de los datos oficiales.

• 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:

$$\overline{\text{Ifr}(e)} \leq \left[ \left( 1 + \frac{G}{100} \right) \text{Id}(e) / C \right]$$

Esta restricción no se puede aplicar ya que no se conoce el valor de  $G$ .

Como se dijo en el marco teórico los ejemplos anteriores demuestran que el valor de  $\text{Id}(e)$ , juega un papel muy importante ya que describe la demanda y es fundamental para el cálculo de la frecuencia en cada tramo.

La restricción que se refiere a la factibilidad del plan de líneas:

$$\overline{\text{Ifr}(e)} \leq \sum_{\substack{e \in E \\ (r,\phi) \in L}} \phi \leq \overline{\text{Ifr}(e)}$$

no se puede aplicar ya que cada tramo lo cubre una sola línea. Lo mismo sucede con el Plande Línea Factible.

La matriz de incidencia sería de la forma:

$$M_{10 \times 10} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

En este caso lo que plantea Lindner (2000) es encontrar una función cuya imagen sea el cronograma del servicio, de tal manera que éste sea óptimo.

• Evento periódico: es la llegada o salida de una estación de la línea Mitre.

• Evento individual es la llegada o salida de un tren particular de la línea Mitre, en el ejemplo se ve claramente que el evento periódico está compuesto por todos los eventos individuales.

•  $\hat{\pi} : \hat{E} \rightarrow R / \hat{\pi}(\hat{e})$  es cada columna del cronograma del servicio de la línea Mitre que está publicada en la página oficial (OFSE, 2015).

Por eso  $E = \{e^{(i)} / i \in Z\}$  es el conjunto de todos los trenes de la línea Mitre que salen de la estación de Retiro con destino a 3 de Febrero, tal que  $\hat{\pi}(e^{(i)}) = \hat{\pi}(e^{(0)}) + Ti$ , donde  $T$  es el período de tiempo entre dos trenes consecutivos. Por ejemplo:  $\hat{\pi}(e^{(0)}) = 5:02$ ,  $\hat{\pi}(e^{(1)}) = 5:13$ ,  $\hat{\pi}(e^{(2)}) = 5:24$ . En estos casos  $T=11$ .

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

• Sea  $E^0 = \{e^{(0)} / e \in E\}$  es el conjunto de la llegada o salida del primer tren de la línea Mitre para asignar el horario a cada elemento del conjunto  $E$  de eventos periódicos, los elementos de  $E^0$  se asignaron previamente.

• Se define la función  $\pi$  como un horario para un conjunto de eventos periódicos  $E$ , siendo la misma:  $\pi: E \rightarrow R / \pi(e) = x \Leftrightarrow \hat{\pi}(e^{(0)}) = x$  para cada  $e \in E$ : es cada fila del cronograma del servicio de la línea Mitre que está publicada en la página oficial (OFSE, 2015). Por ejemplo el horario de salida del tren de la estación 3 de Febrero

Para eventos periódicos se va a usar la siguiente notación:

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

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

En este ejemplo:  $v = \text{Estación 3 de Febrero}$ ,  $r = \text{Línea Mitre}$  y  $\mu = \text{dirección hacia Tigre}$ .

Las diferentes restricciones de tiempo de viaje, de tiempo de espera, de tiempo de regreso, de

tiempo de cambio de tren y de tiempo de avance (las restricciones desde el número 8 hasta la 13) definidas en la sección anterior no se pueden transferir al sistema ferroviario metropolitano porque no se puede acceder a la información sobre las condiciones en la regulación, por lo tanto no se conocen los valores de  $l$  y  $u$  donde  $l$  es el mínimo y  $u$  el máximo tiempo permitido para el tren de una línea particular de un trayecto de una estación a otra.

## 5. Conclusión

El objetivo principal de este trabajo a partir de las propuestas de Törquinst, Bussieck y Lindner, para el sistema de transporte ferroviario de pasajeros en Alemania, es poder transferirlo al AMBA.

Ha quedado revelado que las soluciones a la problemática del sistema de transporte ferroviario de pasajeros en Europa están más desarrolladas (como plantean Bussieck (1998) y Lindner (2000), que las mismas pueden 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), porque la optimización pasa por encontrar una función que describa el cronograma del servicio, suponiendo que otras dificultades básicas ya están resueltas. En cambio, en la Argentina, la optimización pasa por

mejorar muchos aspectos del tipo estructural, como se publica en las propuestas que se hace en el foro de discusión sobre el transporte ferroviario (UNSAM–ITF, 2013) a partir del análisis FODA que realizaron, asimismo como las propuestas que surgen en la 3er Comunicación Nacional de la República Argentina a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (UNSAM–ITF, 2015).

La aplicación de los modelos analizados en la sección 3 no va a ser posible al transporte ferroviario de pasajeros en el AMBA, en tanto no se dispongan datos referidos a la cantidad de pasajeros por día y franja horaria, o por estación; capacidad real del tren, el porcentaje de asientos vacíos que puede soportar la empresa, entre otros.

Otro inconveniente para poder realizar la transferencia es la falta de acceso a la información sobre la regulación del servicio, si bien existe la página oficial del Marco Legal, Normas Ferroviarias, la misma no estuvo disponible durante todo el tiempo que se realizó el trabajo.

Finalmente, se puede asegurar que queda bastante para profundizar, en virtud de que es una problemática que se instaló en muchos países. En lo particular, en lo que se refiere al AMBA, se observa que en lo estructural y organizacional está muy lejos temporalmente cuando se compara con el sistema ferroviario de Alemania y España, lo que hace tan importante el desarrollo de las investigaciones en esta línea.

## Referencias bibliográficas

- Alvarez, R. y Mas, M.M. (2015). Optimización aplicada a la programación de transporte ferroviario de pasajeros. *Revista de Investigación en Modelos Matemáticos aplicados a la Gestión y a la Economía*, 89–115.
- Baron, P. (1995). Transportation in Germany: A Historical Overview. *Transportation Research*, 29(1), 9–20.
- Bobbio, H. (2012). Análisis de las externalidades y políticas de regulación del transporte urbano de pasajeros (tesina de grado). Facultad de Ciencias Económicas, Universidad Nacional del Litoral, Argentina.
- Brännlund, U., Lidberg, P., Nöu, A., y Nilsson, J. (1998). Railway Timetabling using Lagrangian Relaxation. *Transportation Science*, 32(4), 358–369.
- Bussieck, M. (1998). *Optimal Lines in Public Rail Transporte (tesis doctoral)*. Technische Univerität Braunschweig, Braunschweig.
- Bussieck, M., Winter, T., y Zimmermann, U. (1997). Discrete Optimization in public rail transport. *Math Programming*, 79(1–3), 415–444.
- Caprara, A., Fischetti, M., y Toth, P. (2002). Modeling and Solving the Timetabling Problem. *Operations Research*, 50(5), 851–861.
- Carey, M. (1994). A model strategy for train pathing with choice of line, platforms and routs. *Transportation Research*, 28(5), 333–353.
- Carey, M. y Carville, S. (2003). Scheduling and platforming trains at busy complex stations. *Transportation Research*, 37(3), 195–224.
- Chen, Y. (1994). Finding the k quickest simple paths in a network. *Inform Process Lett*, 50, 89–92.
- Claessens, M., Van Dijk, N. y Zwanneveld, P. (1998). Cost Optimal allocation of rail passenger lines. *European J. Oper. Res.*, 110(3), 474–489.
- Comisión Nacional de Regulación de Transporte (CNRT) (2016). *Estadísticas del Transporte Ferroviario*. Recuperado el 2 de marzo de 2016, de Estadísticas del Transporte Ferroviario: <http://www.cnrt.gov.ar/content/estadisticas/ferroviario>
- ——— (2014a). *Estadísticas del Transporte Ferroviario*. Recuperado el 2 de marzo de 2016, de Estadísticas del Transporte Ferroviario: <http://www.cnrt.gov.ar/content/estadisticas/ferroviario>
- ——— (2014b). *Encuesta de opinión a los Usuarios del FFCC*. Recuperado en Febrero de 2015, de Encuesta de opinión a los Usuarios del FFCC. CNRT: <http://www.cnrt.gov.ar/sites/default/files/ENCUESTA%20DE%20OPINI%C3%93N%20A%20LOS%20USUARIOS%20DEL%20FFCC.pdf>
- Even, S. (1979). *Graph Algorithms*. Computer Science Press. New York: Cambridge University Press.
- Higgins, A., Kozan, E. y Ferreira, L. (1996). Optimal Scheduling of trains on a single line track. *Transportation Research*, 30 (2), 141–161.
- Hillier, F.S. y Lieberman, G.J. (2001). *Investigación de operaciones*. Mexico: Mc. Graw Hill.
- Kroon, L., Romeijn, H. y Zwanneveld, P. (1997). Routing trains through railway stations: complexity issues. *European Journal of Operational Research*, 98, 485–498.
- Lindner, T. (2000). Train Schedule Optimization in Public Rail Transport (tesis de doctorado). Technische Univerität Braunschweig, Braunschweig.
- Ministerio del Interior y Transporte, Argentina. (2013). Informe Anual sobre recuperación del Sistema Ferroviario (06–06–2012 al 06–06–2013). Recuperado el 17 de febrero del 2016 de <http://www.preventionweb.net/files/informe-anual-2012%20Sistema%20Ferroviario.%20pdf.pdf>
- Operadora Ferroviaria Sociedad del Estado (OFSE), Argentina. (s.f.). Servicios líneas metropolitanas. Recuperado el 2 de marzo de 2016 de <https://www.sofse.gob.ar/servicios/servicios.php>
- ——— (2014). TRENES ARGENTINOS. Operadora Ferroviaria, Informe de Gestión 2014. Recuperado el 17 de febrero de 2016, de <https://www.sofse.gob.ar/institucional/pdf/periodo-2014.pdf>
- ——— (2015). Red de servicios del Área Metropolitana de Buenos Aires. Recuperado en marzo de 2016, de [https://www.sofse.gob.ar/institucional/pdf/servicios\\_amba.pdf](https://www.sofse.gob.ar/institucional/pdf/servicios_amba.pdf)
- 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. Trabajo presentado en XIV International Conference of Urban Transport. Recuperado de <http://www.codatu.org/>
- Savelsbergh, M. (1994). Preprocessing and probing techniques for mixed integer programming problems. *ORSAJ. Comput*, 6(4), 445–454.
- Törquinst, J. (2005). Computer-based decision support for railway traffic scheduling and dispatching: A review of models and algorithms. Trabajo presentado 5th Workshop on Algorithmic Methods and Models for Optimization of Railways. Recuperado de <http://drops.dagstuhl.de/opus/volltexte/2006/659/>



- UNSAM–ITF. (2013). *Una estrategia para la rehabilitación de ferrocarriles metropolitanos en Buenos Aires*. Foro de discusión sobre el FC suburbano. Recuperado de <http://www.unsam.edu.ar/institutos/transporte/publicaciones/FFCC–Metropolitanos.pdf>
- ——— (2015). *Estudio de Potencial de Mitigación*. Recuperación

*del sistema ferroviario argentino*. Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático. Recuperado en marzo 2016 de [www.ambiente.gov.ar](http://www.ambiente.gov.ar)

- Zwaneveld, P., Kroon, L., Romeijn, E., Salomon, M., Dauzère–Peres, S., Van Hoesel, S. y otros (1996). Trains Through Railway Stations: Model Formulation and Algorithms. *Transportation Science*, 30, 181–194.

### Páginas web consultadas

- Línea Belgrano Norte (s.f.). Recuperado en febrero 2016 de [https://es.wikipedia.org/wiki/L%C3%ADnea\\_Belgrano\\_Norte](https://es.wikipedia.org/wiki/L%C3%ADnea_Belgrano_Norte)
- Línea Urquiza (s.f.) (s.f.). Recuperado en febrero 2016 de [https://es.wikipedia.org/wiki/L%C3%ADnea\\_Urquiza](https://es.wikipedia.org/wiki/L%C3%ADnea_Urquiza)
- Tren Belgrano Norte (s.f.). Recuperado en febrero 2016 de <http://www.trenbelgrano.com.ar/norte/index.php>

### Registro bibliográfico

Mas, M.M. (2016). Inicio de la optimización del sistema de transporte ferroviario en el AMBA. *Revista Ciencias Económicas*, 13(01), 135–151.