

# **HACIA UN DISEÑO EFICIENTE DE SISTEMAS DE TRANSPORTE PÚBLICO EN ÁREAS URBANAS**

**LUIGI DELL'OLIO**

Profesor Ayudante, Universidad de Burgos

**HERNAN GONZALO**

Profesor Ayudante Doctor, Universidad de Burgos

**MARTA ROJO ARCE**

Investigadora, Universidad de Burgos

## **RESUMEN**

Hoy día, la generación de un sistema de transporte eficiente es un problema de gran relevancia en el desarrollo urbano. La importancia del tema se basa en que distintos modos de transporte conllevan diferentes resultados en cuanto a nivel de servicio percibido por los usuarios, así como del coste de funcionamiento del sistema. De esta manera, estas diversidades conducen a diversos niveles de bienestar social. Por ello, el desarrollo de metodologías que permitan obtener y adaptar dinámicamente el sistema de transporte público de acuerdo a los cambios que experimenta una urbe es un problema primario para los planificadores del transporte.

El objetivo de este artículo es analizar las variables que influyen en el problema de diseño de redes eficientes de transporte público urbano y estudiar las relaciones que existen entre la oferta de transporte público y la demanda de viaje, y resaltar la importancia del transporte público como instrumento para un desarrollo sostenible.

Las conclusiones que se sacan son que un diseño eficiente de las redes hace que el transporte público sea más atractivo, y se pueden obtener beneficios económicos y sociales relevantes a un coste admisible, optimizando unas variables de diseño de las redes de transporte público urbano.

## **1. INTRODUCCIÓN**

En los últimos años, los problemas de planificación de los sistemas de transporte público han recibido una atención especial, debido a la posibilidad de optimizar los recursos destinados a los transportes para conseguir una serie de objetivos específicos, como pueden ser la reducción de los tiempos de viaje, la congestión, la polución, los consumos energéticos, etc. Es por esta razón que en los últimos años los investigadores han realizado importantes esfuerzos en el diseño eficiente de redes de transporte público de superficie. En particular, hay estudios dirigidos a mejorar la frecuencia ([Furth and Wilson, 1981](#); [Kocur and Hendrickson, 1986](#); [Ceder, 1984](#); [Constantin and Florian, 1995](#)), y otros que se dirigen a mejorar la configuración de las líneas ([Newell, 1979](#); [Ceder and Wilson, 1986](#)).

Este interés también se ha visto incrementado en Europa, donde se está pasando de un monopolio público a una situación de apertura de libre mercado en lo que se refiere a las condiciones de concurrencia a las licitaciones de las concesiones.

En este contexto, el objetivo general de un eficiente sistema de transporte es conseguir una serie de objetivos, en algunos casos contradictorios, como por ejemplo: desarrollo de una movilidad sostenible, concentración de los servicios de transporte en las áreas de alta demanda para variar los repartos modales, extensión de los servicios en las áreas de baja demanda para garantizar la accesibilidad "social" del territorio, logro de objetivos de eficacia y eficiencia en términos económicos y/o financieros... Por tanto, dicha planificación debe ir dirigida a la creación de un sistema integrado dentro del sistema de ordenación territorial.

La Planificación del sistema de transportes va más allá de considerar las redes actuales de las diferentes empresas, ya que debe tener en cuenta, además, las dotaciones infraestructurales existentes en el territorio y el cuadro legislativo y normativo de referencia.

La Planificación debe, por lo tanto, referirse a un sistema integrado de transporte público, y puede dividirse en 3 partes:

1. Explotación
2. Integración física de los transportes
3. Integración institucional

Se hace necesario por tanto, planificar no sólo las diferentes variables de servicio de las empresas individuales, sino también la coordinación de los itinerarios y los horarios entre todas las empresas, así como las capacidades relativas de los medios (vehículos).

La Planificación de la integración física es objeto de diferentes líneas de investigación, tanto a nivel nacional como internacional, y contiene una multiplicidad de aspectos, que van desde la formación a la localización y a la organización interior de las terminales del transporte colectivo.

## **2. ELEMENTOS A CONSIDERAR PARA CLASIFICAR LOS MODELOS DE DISEÑO DE REDES DE TRANSPORTE URBANO**

El problema de la planificación de las redes de transporte, también llamado *Network Design Problem* (NDP), se refiere a la determinación de la configuración de la red, dirigida al logro de determinados objetivos, sometido a determinadas restricciones. El subconjunto de estos problemas referentes a las redes de transporte colectivo se denomina Transit Network Design Problem (TNDP).

El trabajo clásico de referencia sobre el NDP es el de Magnanti y Wong, (1984). En la última década, el concepto de NDP ha sido extendido a otro tipo de variables y a ulteriores objetivos.

Existe una amplia clase de métodos y modelos matemáticos, con el fin de respaldar al planificador en la planificación de las redes de transporte. Una primera clasificación puede ser realizada sobre la base de los siguientes elementos:

1. Variables de proyecto, subdivididas en estratégicas (flota, terminal, depósitos) y táctico-operativas (itinerarios, frecuencias, calendarios, turnos de personal y vehículos).
2. Objetivos de proyecto (sociales, empresariales, mixtos).
3. Restricciones de proyecto (externos, técnicos, coherencia flujos/demanda/costes).

Los objetivos de proyecto pueden ser: sociales (dependen del coste generalizado total soportado directamente por los usuarios del servicio o indirectamente por la colectividad); empresariales

(relativos al coste de inversión y/o gestión de los servicios de transporte público); o mixtos (una combinación de los objetivos sociales y empresariales).

Las restricciones que se deben tener en cuenta pueden ser:

- Externas, que se refieren por ejemplo a la disponibilidad de un presupuesto máximo de gasto o bien a la presencia de umbrales máximos de concentraciones de contaminantes, etc.
- Técnicas, que se refieren en primer lugar a las relaciones flujos de vehículos/capacidad de la red, en segundo lugar, a las frecuencias mínimas y máximas de los vehículos y en tercer lugar, a las características de las infraestructuras y de los vehículos utilizados.
- La consistencia entre flujos, demanda y costes, que tiene que ver con las hipótesis planteadas en los modelos solución.

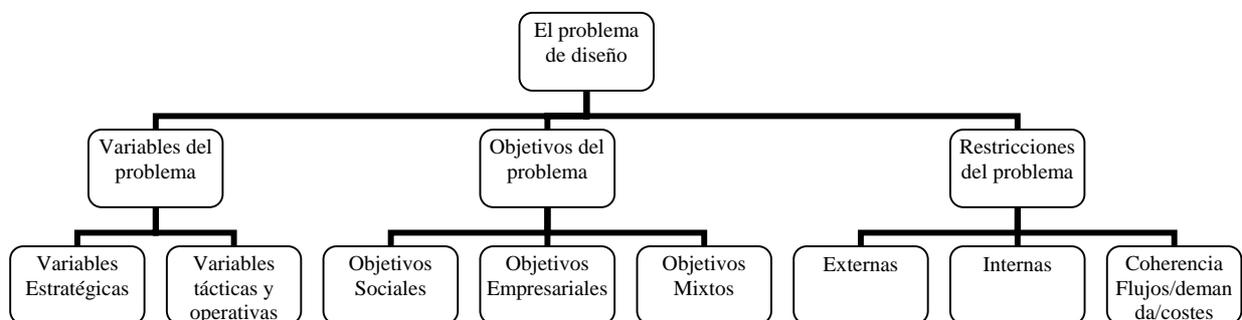


Figura 1. Elementos de clasificación de los modelos (Russo et al., 2002)

Además, deben definirse dos factores importantes.

- El **gestor del sistema** o de la empresa de transporte colectivo, que tiene en general el objetivo de maximizar la eficiencia en relación a los costes empresariales y la eficacia en referencia a los usuarios. Con el fin de alcanzar tales objetivos, actúa sobre algunas variables que, en el caso del transporte colectivo, pueden ser los itinerarios, frecuencias y horarios.
- El **usuario del sistema** de transporte colectivo que es considerado por el analista como un decisor racional (teoría de la utilidad casual) y como tal efectúa dos tipos de elección:
  - *Preventiva*, con la cual, antes de iniciar el trayecto, el usuario utiliza las informaciones disponibles relativas a diferentes recorridos, por ejemplo, aquéllas obtenidas en viajes ya realizados.
  - *Adaptativa*, que significa que, en el momento de utilizar un transporte, las elecciones *Preventivas* anteriores pueden verse condicionadas por la realidad del sistema, es decir, por la aparición de líneas y/o servicios de diferente “utilidad”, pero que también son elegibles, de forma que dicho usuario se adapta asimismo a las condiciones operacionales de los servicios en el momento.

Los modelos existentes se deben utilizar como ayuda al planificador en la resolución del diseño óptimo de redes. Pueden considerarse por tanto dos tipos, resultando así modelos de:

- Optimización (modelos analíticos y modelos de red);
- Simulación.

Los dos enfoques difieren por las particularidades con que viene modelizada la interacción entre las estrategias del gestor y del usuario.

En el enfoque de *optimización*, las soluciones (diseño y/o configuración de la oferta) son generadas a través de un modelo, y analizadas y evaluadas mediante procesos generalmente iterativos.

En el enfoque de *simulación* se definen múltiples diseños y/o configuraciones de la oferta, sobre la base de la experiencia del planificador, las cuales se analizan y se evalúan a través de diferentes modelizaciones.

El enfoque de simulación se basa en soluciones propuestas por el planificador, sobre la base de experiencias específicas de la realidad. Mediante simulación del funcionamiento del sistema, tales soluciones son valoradas, confrontadas y, eventualmente mejoradas. Las líneas de investigación en el ámbito de la simulación consideran además de la simulación estática (verificación de capacidad), una simulación interactiva basada en la comparación de varias hipótesis de configuración de red (Di Gangi y Montella, 1995).

### **3. LOS MODELOS DE OPTIMIZACIÓN Y LOS MODELOS DE SIMULACIÓN: ESTADO DEL ARTE**

En el enfoque de optimización se pueden destacar, los *modelos analíticos*, caracterizados por establecer una serie de esquemas con los que es posible plantear un problema e investigar las soluciones exactas, y los *modelos de red*, que utilizan todas las potencialidades ofrecidas por la teoría de los grafos.

- *Modelos analíticos*  
El enfoque analítico representa el área de estudio con formas regulares y características constantes. Además, establece la hipótesis de una demanda de transporte modal constante y la red definida por geometrías completamente elementales. Con tales simplificaciones han sido elaboradas varias estructuras de red: desde las monocéntricas (many to one, one to many) (Pratelli, 1992), a las policéntricas (many to many) (Pratelli, 1992; [Vaughan, 1986](#)).
- *Modelos sobre red*  
Este tipo de modelos, se agrupan de manera tal que quede evidenciada por un lado, la presencia de una variable única de Planificación (flota, itinerarios, frecuencias, horarios), o bien varias variables de planificación.

En el enfoque de simulación, se pueden citar los trabajos de Janarthanan y Schneider (1986) y Di Gangi y Montella (1995).

Janarthanan y Schneider (1986) individualizan como elemento fundamental en el ámbito del proceso de planificación de un sistema de transporte público la valoración de las diferentes alternativas de planificación. Tal valoración se basa en un método multicriterio sobre la base de objetivos relativos al usuario, la comunidad y la empresa.

De Giorgi y Montella (1995) proponen un procedimiento que tiene como objetivo la definición de los itinerarios y las frecuencias. Está basado en la comparación de alternativas de planificación definidas a priori. La elección de las alternativas se efectúa a través de la comparación de un conjunto de indicadores de eficacia, eficiencia y calidad, llevado a cabo a través de un análisis multicriterio.

#### 4. EL ENFOQUE DE OPTIMIZACIÓN - SIMULACIÓN

En general, si en el Problema de Diseño de Redes de Transporte Público interactúan un modelo de optimización con un **modelo de comportamiento de los usuarios** del sistema, a fin de evaluar adecuadamente cada una de las soluciones analizadas por el algoritmo de diseño, se está aplicando un enfoque de optimización-simulación (Figura 2).

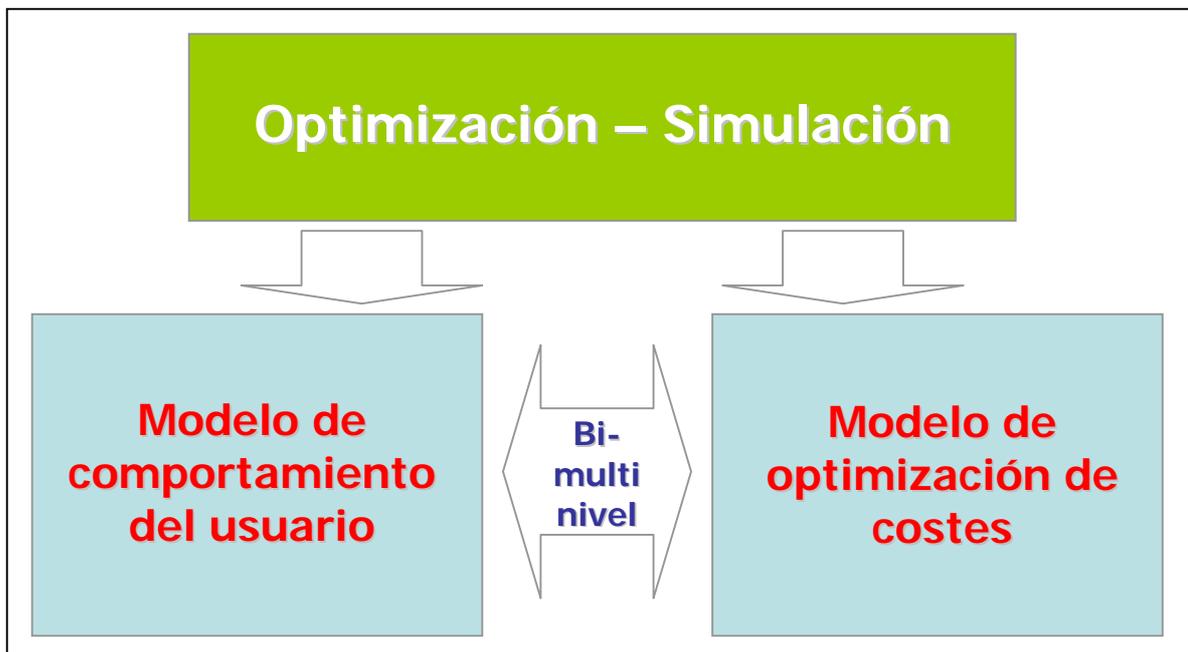
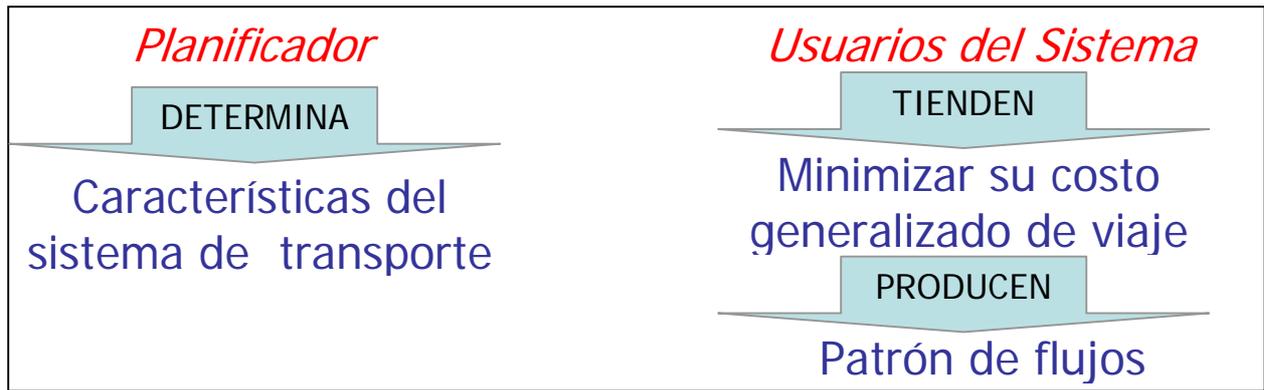


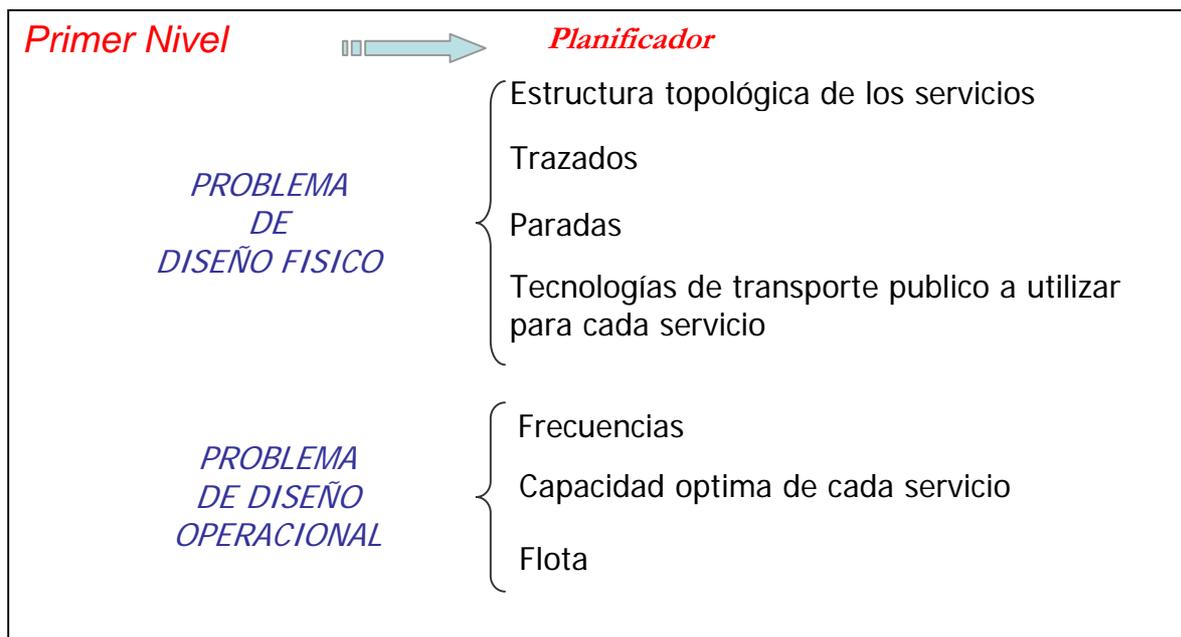
Figura 2. Enfoque de optimización – simulación

Cuando se utiliza dicho enfoque, una manera correcta para acercarse al TNDP es a través de un *juego no cooperativo de dos niveles (Juego de Stackelberg)*. (Stackelberg, 1952). En este juego participan el planificador, que determina las características del sistema de transporte, y los usuarios del sistema, que tienden a minimizar su coste generalizado de viaje, produciendo un patrón de flujos sobre este sistema. En el coste generalizado de viaje se incluyen todos los elementos que un individuo valora a la hora de realizar un viaje, como el tiempo de acceso al sistema de transporte, el tiempo de espera, el tiempo de viaje en vehículo, la comodidad del viaje, la tarifa, la seguridad etc.



**Figura 3.** Participación del planificador y los usuarios del sistema

En el primer nivel, en primera instancia, el planificador define la estructura topológica de los servicios, estableciendo los trazados y las tecnologías de transporte público a utilizar para cada servicio (problema de diseño físico). En una segunda etapa el planificador determina las características operacionales del sistema, como frecuencia y capacidad óptimas para cada servicio (problema de diseño operacional).



**Figura 4.** Actuaciones del planificador

En el segundo nivel, se encuentran los usuarios del sistema, los cuales reaccionan frente a esta estructura de servicios generando un perfil de flujos sobre dichos servicios de transporte público propuestos. Este segundo nivel esta modelado normalmente a través de un modelo de comportamiento, que permite predecir la asignación de los usuarios a la estructura de transporte público analizada. (Norambuena, 2002).

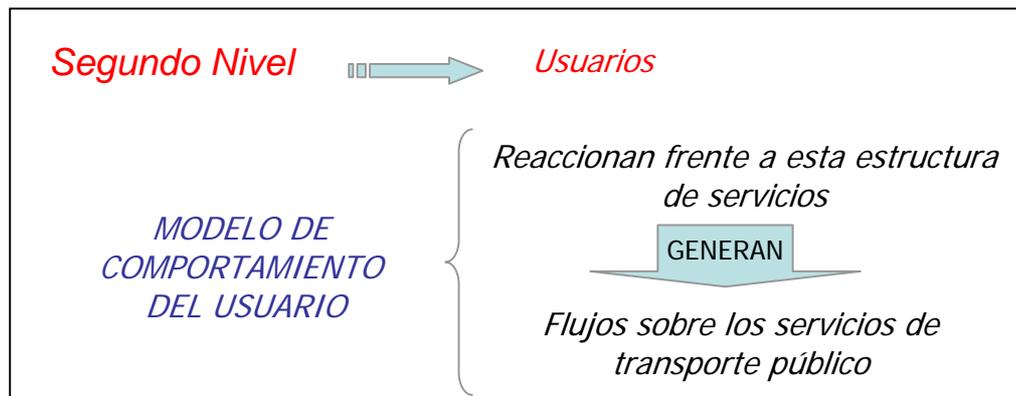


Figura 5. Actuaciones de los usuarios

En la bibliografía, se pueden apreciar una serie de estudios de diseño de redes de transporte utilizando dicha técnica (Yang and Bell, 1998; Yang, 1997; Wong and Yang, 1997; Yang and Bell, 1997; dell’Olio et al., 2006). En particular, dichos trabajos resuelven el problema a través de modelos de optimización bi-nivel o multi-nivel.

Las ventajas de utilizar este tipo de enfoque se derivan directamente de las características de los modelos que usualmente se utilizan en él. Estamos hablando de los modelos de optimización bi-nivel e multi-nivel. En estos tipos de modelos, el algoritmo de solución propuesto es principalmente de tipo heurístico, y se acerca a la solución óptima a través de sucesivas aproximaciones que consisten en actualizar, mediante iteraciones, las variables de decisión, de modo que la función objetivo del nivel superior se “desplace” hacia sus valores mínimos.

Esta característica, que puede parecer en principio una desventaja, se convierte en un arma muy importante que permite al planificador considerar la vinculación oferta-demanda, en cada iteración. De esta manera se puede contar con flujos de equilibrio *consistentes* con las variables de diseño que se calculan y modificar en cada iteración del algoritmo de solución.

## 5. CONCLUSIONES

Hoy en día es muy importante resolver el TNDP. En particular, dentro los objetivos de proyecto, es necesario considerar objetivos mixtos (sociales y empresariales). De esta manera obtendríamos una solución al problema, encontrando un compromiso entre las exigencias de los usuarios del sistema y los empresarios.

El uso de un objetivo mixto nos permite alcanzar indirectamente otro objetivo fundamental: la sostenibilidad (en particular, movilidad sostenible y sostenibilidad medioambiental). Para obtener resultados mucho más importantes desde el punto de vista de la sostenibilidad medioambiental, es importante considerar también como variable de decisión en los TNDP la tipología de medio de transporte.

Si se planifica el sistema de transporte público y se optimiza utilizando estas técnicas, el transporte público se hace más atractivo para los usuarios y no demasiado costoso para las empresas de transporte público. En base a un estudio llevado a cabo con estas técnicas por dell’Olio et al. (2006) sobre el sistema de transporte público urbano de la ciudad de Santander, se

obtenía una reducción de los coste totales (sociales y empresariales) del 10%, una reducción sustancial de los costes del usuario (9%) y un incremento del 1% de los costes empresariales.

El uso de un enfoque de optimización - simulación se considera mas adecuado respecto a los métodos tradicionales, ya que dicho enfoque permite considerar la vinculación entre oferta y demanda. De esta manera, se asegura la consistencia entre los flujos de equilibrio y las variables de decisión del problema, calculados en cada iteración del algoritmo.

Sin embargo, este método también tiene un inconveniente, ya que no se puede garantizar la unicidad de la solución, que, como en la mayoría de los casos, y debido a la no linealidad del problema, con mucha probabilidad dependerá de las soluciones iniciales factibles con las que se comienza el algoritmo. No obstante, y como es típico de estos estudios, se puede afirmar que la obtención de un óptimo local es adecuado para dar una solución a este tipo de problema ante la alternativa de no hacer nada.

## BIBLIOGRAFÍA

- (1) [Furth, P., N.H.M. Wilson \(1981\) Setting frequency on bus routes: Theory and practice. Transportation Research Record 818, 1-7.](#)
- (2) [Kocur, G. y C. Hendrickson \(1982\) Design of Local Bus service with demand Equilibrium. Transportation Science, 16\(2\), 149-170.](#)
- (3) [Ceder A. \(1984\) "Bus frequency determination using passenger count data", Transportation Research A n.18, pp.439-453.](#)
- (4) [Constantin, I., Florian, M. \(1995\) Optimizing frequencies in a transit network: a nonlinear bi-level programming approach. International Transactions in Operational Research 2, 149-164.](#)
- (5) [Newell, G. \(1979\) Some issues relating to the optimal design of bus routes. Transportation Science 13, 20-35.](#)
- (6) [Ceder A., N.H.M. Wilson \(1986\) Bus network design. Transportation Research, Vol. 20B pp. 331-334.](#)
- (7) [Magnanti, T.L., R.T. Wong \(1984\) Network design and transportation planning: methods and algorithms. Transportation Science, vol. 18, 1, pp. 1-51.](#)
- (8) [Russo F., et al. \(2002 \) Modelli e metodi per la programmazione dei servizi di trasporto pubblico locale: uno stato dell'arte. Franco Angeli Editore.](#)
- (9) [Di Gangi M., B. Montella \(1995\) Progetto di una rete di trasporto collettivo mediante indicatori di prestazione. In Metodi e modelli per la pianificazione e la gestione dei sistemi di trasporto collettivo a cura di Nuzzolo A. e Russo F., pp.13-51, Franco Angeli Editore.](#)
- (10) [Pratelli A. \(1992\) Modelli matematico-analitici per il progetto delle reti di trasporto collettivo. Quaderno n. 3, Istituto di Costruzioni stradali e trasporti. Università di Pisa.](#)
- (11) [Vaughan R. \(1986\) Optimum polar networks for an urban bus system with a many-to-many travel demand, Transportation Research, Vol. 20B, pp. 215-224.](#)
- (12) [Janarthanan N., J. Schneider \(1986\) Multicriteria Evaluation of Alternative Transit System Designs. Transportation Research Record 1064, pp. 26-34.](#)
- (13) [Stackelberg H. \(1952\) The theory of market economy. William Hodge, London.](#)
- (14) [Norambuena, I. J. \(2002\) Diseño optimo de sistemas de transporte urbano. Master of science thesis. Pontificia Universidad Católica de Santiago de Chile.](#)
- (15) [Yang, H., M. Bell \(1998\) Models and algorithm for the road network design: a review and some new development. Transport Review 18, 257-278.](#)
- (16) [Yang, H. \(1997\) Sensitivity analysis for the elastic-demand network equilibrium problem with application. Transportation Research B 31, 55-70.](#)
- (17) [Wong, S.C., H. Yang \(1997\) Reserve capacity of a signal-controlled road network. Transportation Research B 30, 397-402.](#)
- (18) [Yang, H., M. Bell \(1997\) Traffic restraint, road pricing and network equilibrium. Transportation Research B 31, 303-314.](#)
- (19) [dell'Olio, L., J. L. Moura y A. Ibeas \(2006\) A bi-level mathematical programming model to locate bus stops and optimise frequencies. TRB 85th Annual Meeting and Transportation Research Record, Washington, Estados Unidos.](#)