

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

Departamento de Matemática

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN INTERNO

Un modelo integrado para el problema de
planificación de líneas y enrutamiento de
pasajeros.

PRESENTADO POR:

Dr. Ramiro Torres

Diciembre 2015

1. Título del Proyecto

Un modelo integrado para el problema de planificación de líneas y enrutamiento de pasajeros.

2. Tema principal

El problema de planificación de líneas es una de las fases más importantes en el proceso de planificación estratégica de un sistema de transportación pública. El problema consiste en determinar un conjunto de líneas y sus correspondientes frecuencias, tal que la demanda sea cubierta. El enrutamiento de pasajeros sobre la planificación producida es un reto importante y tiene que ser considerada en alguna fase del proceso de planificación. Muchas trabajos y varios tipos de modelos han sido reportados en la literatura: se produce inicialmente un enrutamiento de pasajeros y luego se determina las líneas y frecuencias de forma secuencial, o formulaciones integradas de gran escala que son consideradas computacionalmente intratables.

En el presente trabajo se pretende formular un modelo integrado para el problema de planificación de líneas y enrutamiento de pasajeros maximizando conexiones directas, es decir, se plantea encontrar un plan de líneas, procurando que los pasajeros no realicen transferencias entre líneas para llegar a su destino. Se plantea estudiar su complejidad computacional y diseño de métodos de solución para grafos que se derivan del Sistema Trolebús. Algoritmos polinomiales para algunos casos especiales del problema pueden ser presentados. Finalmente, se plantea realizar la implementación computacional de los modelos y algoritmos obtenidos y experimentar con instancias reales proporcionadas por el personal del Sistema Trolebús.

2.1. Palabra Clave

Transporte público, problema de planificación de líneas, complejidad computacional.

2.2. Area de investigación y campo de actividad

Optimización combinatoria, programación lineal y entera, transporte público.

3. Antecedentes

La planificación de los sistemas de transporte público ha sido un importante campo de investigación de la optimización combinatoria durante los últimos años, donde problemas con miles de variables y restricciones han sido analizados. Uno de estos problemas es el que aparece en la segunda fase del proceso de planificación estratégica de un sistema de transporte, el problema de planificación de líneas (LPP). Dada una red vial, la tarea de LPP es escoger un conjunto de rutas y sus respectivas frecuencias en tal forma que la demanda de transportación sea cubierta y una función objetivo conocida sea optimizada. Los posibles objetivos son maximizar la calidad de servicio o minimizar los costos globales para el sistema.

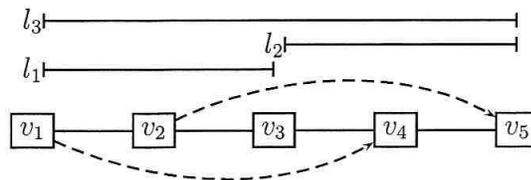
Muchos trabajos relacionados al LPP han sido previamente reportados en la literatura. Así, Bussieck, Kreuzer, y Zimmermann [6] desarrollaron un modelo de programación entera que maximiza el número de viajes directos. Goossens, van Hoesel, y Kroon [8] presentan una aproximación orientada a la minimización de costos y describen algoritmos tipo branch-and-cut para resolver el problema. Esta formulación se basa en el trabajo de Claessens, van Dijk y Zwaneveld [7], en el que se deja de lado el interés de los pasajeros y se toman en cuenta los costos del plan de transporte del sistema. Lindner [9] también estudia la minimización de costos y desarrolla un método tipo branch-and-bound para encontrar el conjunto de líneas óptimas. En el artículo escrito por Nachtigall y Jerosch [10], los autores presentan un modelo donde no sólo se trate con la comodidad del pasajero (como en [12]) sino también se minimicen costos. En estas aproximaciones se utiliza una técnica conocida como *System Split* [5].

Borndörfer, Grötschel, y Pfetsch [1] dejan de lado el concepto de *Line Pool* y system split y reporta una formulación donde los pasajeros se enrutan libremente en líneas generadas dinámicamente. Schöbel and Scholl [12] abordan el problema mediante la construcción de una red de transporte llamada *Change&Go*, donde los pasajeros pueden realizar transferencias entre líneas. Esta aproximación se basa en modelos de flujo multi-producto. Borndörfer y Karbstein [3, 4] proponen un modelo para LPP en el que se maximiza el número de viajes directos, el que puede ser considerado como una evolución de [6]. Además, el enrutamiento de pasajeros es un factor importante en otras fases de la planificación estratégica [2, 11], donde los autores investigan la influencia del enrutamiento de pasajeros en la generación de horarios (diagramas de marcha).

Para el caso ecuatoriano, L. Torres, R. Torres, R. Borndörfer y M. Pfetsch [13] abordan el problema de planificación de líneas para el Sistema Trolebús (ST) de la ciudad de Quito. Los autores analizan el problema para topolo-

gías especiales (caminos y árboles) derivados del sistema de transporte. El ST transporta aproximadamente 250,000 pasajeros diariamente, esta conformada por un corredor principal y un sistema de líneas de alimentación. El corredor principal opera en carriles exclusivos independientes del resto de tráfico y es servido por buses de gran capacidad; las líneas alimentadoras transportan a los pasajeros entre las tres terminales de transferencia localizadas en lugares estratégicos de la ciudad y los barrios cercanos. Buses normales son usados en el sistema de alimentación.

El presente trabajo pretende estudiar el caso en el que se analice en forma conjunta el problema de planificación de líneas y el enrutamiento de pasajeros, es decir, encontrar un conjunto de líneas con sus respectivas frecuencias y se incentive o se exija exclusivamente viajes directos. La nueva formulación considera un enfoque diferente al presentado por L. Torres, R. Torres, R. Borndörfer y M. Pfetsch, ya que evita el uso del método system split y se propone una orientación hacia los clientes(customer-oriented) minimizando transferencias y por ende tiempos de viaje. Para visualizar de mejor forma las diferencias consideremos la siguiente red de transporte con 5 estaciones:



Sobre la red se definen dos pares origen-destino $\{(v_1, v_4), (v_2, v_5)\}$ con demanda iguales a 1 y tres posibles líneas $\{l_1 = (v_1, v_3), l_2 = (v_3, v_5), l_3 = (v_1, v_5)\}$ con costos $c_{l_1} = 1, c_{l_2} = 1, c_{l_3} = 3$. En [13], los pares origen-destino son transformados en demanda sobre los arcos impidiendo de este modo optimizar las transferencias de pasajeros sobre las líneas generadas y la solución tomaría las líneas l_1 y l_2 con frecuencia igual a 2 y costo total igual a 4. Notar que las líneas seleccionadas producen 2 transferencias de pasajeros que no pueden ser determinadas por el modelo. Si embargo, si se considera un enfoque orientado a los usuarios sin transferencias, la solución tomaría la línea l_3 con frecuencia 2 produciendo de esta forma cero cambios de líneas para los usuarios del sistema.

4. Objetivos

4.1. Objetivo general

Diseño e implementación de un modelo matemático y algoritmos eficientes de solución para el problema integrado de planificación de líneas y enrutamiento de pasajeros, con aplicación al Sistema Trolebús.

4.2. Objetivos específicos

- Investigación del estado del arte en cuanto a modelos matemáticos integrados para el problema de planificación de líneas y enrutamiento de pasajeros.
- Formulación de un modelo de programación lineal y entera para resolver el problema integrado de planificación de líneas y enrutamiento de pasajeros.
- Implementación computacional del modelo propuesto empleando un solver de programas enteros de código abierto (SCIP) o software comercial (GUROBI).
- Estudio de complejidad computacional y desarrollo de algoritmos eficientes para resolver el modelo propuesto.
- Conducir experimentos computacionales con instancias reales de diferentes tamaños para evaluar el comportamiento del modelo y de los algoritmos propuestos.
- Fortalecer la línea de investigación Modelos de Transporte y Contaminación del Departamento de Matemática.

5. Metodología y descripción del proyecto

La metodología a emplearse en el presente proyecto es la usualmente aplicada en los proyectos de investigación en el campo de la optimización combinatoria. Así, nosotros seguiremos los siguientes pasos:

1. Se iniciará con una completa investigación bibliográfica del estado del arte en cuanto a las técnicas y modelos de optimización usados para estudiar el problema integrado de planificación de líneas y enrutamiento de pasajeros y los respectivos métodos de solución propuestos.

2. Se formulará un modelo de programación lineal y entera para el problema integrado de enrutamiento de pasajeros y planificación de líneas y frecuencias, con aplicación al Sistema Trolebús.
3. Se implementará el modelo propuesto en un solver de programación lineal y entera de código abierto (SCIP) o un solver comercial (GUROBI). Esta tarea es realizada para verificar la validez de la formulación.
4. Se seleccionará instancias consideradas pequeñas para la experimentación del modelo propuesto. En base a estos experimentos computacionales el modelo será calibrado, y de ser el caso reformulado para cubrir todas las restricciones y obtener soluciones factibles.
5. Se realizará el estudio teórico del modelo diseñado con el fin de identificar propiedades y estructuras especiales de la formulación, lo que podría ayudar en el diseño de algoritmos de solución. Diferentes esquemas pueden ser usados como branch & bound, branch & cut, métodos heurísticos o posiblemente identificar casos polinomiales.
6. Se implementará computacionalmente los algoritmos generados en el lenguaje de programación C++
7. Se ejecutará experimentos computacionales basados en instancias reales y así obtener conclusiones sobre su desempeño.
8. Finalmente, todos los resultados serán reportados en un artículo técnico.

6. Resultados y productos esperados

Como resultados del proyecto se espera obtener un nuevo modelo de optimización y algoritmos eficientes de solución que permitan resolver el problema central de esta investigación, el problema integrado de enrutamiento de pasajeros y planificación de líneas y frecuencias. Los algoritmos de solución serán implementados en el lenguaje de programación C++ y sus resultados serán comparados con las soluciones obtenidas mediante la implementación del modelo entero en un solver de programación lineal y entera (GUROBI, SCIP). Estos modelos y algoritmos serán genéricos para poder ser replicados en sistemas de transporte similares, tanto en Quito como en otras ciudades del país.

Cabe destacar que el presente tema de investigación se enmarca en una de las líneas de investigación del Departamento de Matemática, aquella que

se ocupa precisamente del desarrollo de modelos de optimización para problemas de transporte y contaminación. Por tanto, este proyecto tiene gran potencial para motivar la ejecución de nuevos proyectos de investigación en otros temas concernientes a la planificación de tráfico y transporte.

Finalmente, como productos finales de la presente investigación se espera producir un artículo enviado para publicación en una revista indexada en SCIMAGO-SCOPUS y una disertación a la Comunidad Politécnica, de acuerdo a lo estipulado en el Art. 22 del reglamento vigente para la evaluación de proyectos de investigación internos.

7. Nombres de los proponentes

- Dr. Ramiro Torres
Departamento de Matemática,
Escuela Politécnica Nacional
Tiempo de dedicación: 44 semanas \times 10 horas/semana= 440 horas.

8. Plazo y cronograma de actividades

8.1. Plazo

12 meses

8.2. Fecha de inicio

Enero 2016

8.3. Cronograma

Actividades		Bimestre					
		1	2	3	4	5	6
1	Investigación del estado del arte.	■					
2	Formulación de un modelo de programación lineal y entera.	■					
3	Implementación del modelo en SCIP o GUROBI, corrección y calibración.		■				
4	Estudio teórico del modelo diseñado.			■	■		
5	Desarrollo de algoritmos de solución.			■	■		
6	Implementación del método de solución				■	■	
7	Experimentación con instancias reales.					■	
8	Preparación del informe final del proyecto.						■
9	Preparación de un artículo técnico.					■	■

El cronograma de trabajo está expresado en bimestres y la fecha tentativa para el inicio del proyecto es noviembre de 2015.

9. Presupuesto y financiamiento

Los gastos del presente proyecto comprenden el rubro correspondiente al tiempo de dedicación del proponente.

Gastos Personales	USD
Ramiro Torres	8902,14
Total	8902,14

10. Firma

Quito, diciembre de 2015



 Dr. Ramiro Torres

Referencias

- [1] Ralf Borndörfer, Martin Grötschel, and Marc E. Pfetsch. A path-based model for line planning in public transport. *ZIB*, 2004.
- [2] Ralf Borndörfer, Heide Hoppmann, and Marika Karbstein. Timetabling and passenger routing in public transport. Technical Report 15-31, ZIB, Takustr.7, 14195 Berlin, 2015.
- [3] Ralf Borndörfer and Marika Karbstein. A direct connection approach to integrated line planning and passenger routing. In Daniel Delling and Leo Liberti, editors, *ATMOS 2012 - 12th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modelling, Optimization, and Systems*, volume 25, pages 47 – 57, 2012.
- [4] Ralf Borndörfer and Marika Karbstein. Metric inequalities for routings on direct connections with application in line planning. Technical Report 15-07, ZIB, Takustr.7, 14195 Berlin, 2015.
- [5] A. Bouma and C. Oltrogge. Linienplanung und Simulation für öffentliche Verkehrswege in Praxis und Theorie. *ETR - Eisenbahntechnische Rundschau*, 43(6):369–378, 1994.
- [6] Michael R. Bussieck, Peter Kreuzer, and Uwe T. Zimmermann. Optimal lines for railway systems, 1995.
- [7] M.T. Claessens, N.M. van Dijk, and P.J. Zwaneveld. Cost optimal allocation of rail passenger lines. *European Journal of Operational Research*, 110(3):474 – 489, 1998.
- [8] Jan-Willem Goossens, Stan van Hoesel, and Leo Kroon. A branch-and-cut approach for solving railway line-planning problems. *Transportation Science*, 38(3):379–393, August 2004.
- [9] T. Lindner and U.T. Zimmermann. Train schedule optimization in public rail transport. Technical report, Ph. Dissertation, Technische Universität, 2000.
- [10] Karl Nachtigall and Karl Jerosch. Simultaneous network line planning and traffic assignment. In *ATMOS*, 2008.
- [11] Marie Schmidt and Anita SchÄübel. The complexity of integrating passenger routing decisions in public transportation models. *Networks*, 65(3):228–243, 2015.

- [12] Anita Schöbel and Susanne Scholl. Line Planning with Minimal Traveling Time. In Leo G. Kroon and Rolf H. Möhring, editors, *5th Workshop on Algorithmic Methods and Models for Optimization of Railways (ATMOS'05)*, volume 2 of *OpenAccess Series in Informatics (OASICs)*, Dagstuhl, Germany, 2006. Schloss Dagstuhl–Leibniz-Zentrum fuer Informatik.
- [13] Luis M. Torres, Ramiro Torres, Ralf Borndörfer, and Marc E. Pfetsch. Line planning on paths and tree networks with applications to the quito trolebus system (extended abstract). Technical Report 08-53, ZIB, Takustr.7, 14195 Berlin, 2008.