



A. PROPUESTA PROYECTO DE INVESTIGACIÓN INTERNO SIN FINANCIAMIENTO

a. TIPO DE INVESTIGACIÓN:

Básica	X	Aplicada	
---------------	----------	-----------------	--

b. UNIDAD EJECUTORA (*Departamento, Instituto o Estructura de Investigación*):

1. Departamento de Matemática.

c. LINEA(S) DE INVESTIGACIÓN:

1. Optimización en transporte y logística.
2. Optimización en grafos y estructuras discretas.

d. TÍTULO DEL PROYECTO (*mínimo 10 palabras*):

Métodos exactos para el problema de asignación de flota con aplicación al Sistema Trolebús.

e. RESUMEN (*máximo 200 palabras*)

El problema de asignación de flota es una de las fases más importantes en el proceso de planificación operacional de un sistema de transportación pública. El problema consiste en asignar una flota heterogénea de vehículos distribuida en distintos depósitos a un conjunto de viajes programados previamente en la fase de planificación estratégica. Diferentes objetivos como la minimización de los costos totales o la minimización de los tiempos de inactividad de la flota pueden ser considerados. Enfrentar un problema de este tipo es una tarea extremadamente complicada por lo que ha sido centro de intensa investigación en los últimos años en el campo de la optimización combinatoria.

Así, en el presente proyecto se pretende aportar con el desarrollo de modelos matemáticos de optimización discreta y métodos exactos de solución para el problema de asignación de flota aplicados a un sistema de transporte público. Se plantea estudiar su complejidad computacional y diseñar métodos exactos de solución para el problema derivado del Sistema Trolebús. Debido a la estructura del sistema estudiado, algoritmos polinomiales para algunos casos especiales del problema pueden ser identificados. Se plantea implementar computacionalmente los modelos y algoritmos diseñados y realizar experimentos considerando instancias reales.

f. PALABRAS CLAVE (*4-6*)



Programación entera – Branch & Cut - Asignación de flota – Transporte público.

g. OBJETIVOS

7.1. OBJETIVO GENERAL

Diseñar e implementar un modelo de programación lineal entera y un algoritmo exacto de solución para el problema de asignación de flota, con aplicación al Sistema Trolebús.

7.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a. Formular un modelo de programación lineal entera para resolver el problema de asignación de flota de un sistema de transporte público.
- b. Implementar computacionalmente el modelo propuesto empleando el solver de programación entera GUROBI.
- c. Desarrollar un algoritmo exacto tipo Branch & Cut para el problema estudiado.
- d. Conducir experimentos computacionales para evaluar el comportamiento del modelo y del algoritmo diseñado.
- e. Elaboración de un artículo técnico.

h. HIPÓTESIS (opcional)

- a. Se dispone de la planificación estratégica del sistema de transporte público.
- b. La programación lineal entera constituye un método apropiado para modelar el problema de asignación de flota, considerando ciertas particularidades presentes en el Sistema Trolebús.
- c. Algoritmos tipo Branch & Cut pueden ser adecuados para resolver el problema de asignación de flota en un sistema de transporte público.

i. DETALLE DE LOS RESULTADOS ESPERADOS (con relación a los objetivos)

- a. Un modelo de programación lineal entera para resolver el problema de asignación de flota asociado a un sistema de transporte público.
- b. Un algoritmo exacto tipo Branch & Cut para el problema estudiado.
- c. Un programa escrito en C++ con la implementación del modelo y del algoritmo exacto de solución.
- d. Artículo científico o exposición en un congreso internacional evaluado por pares.

j. IMPACTO DE LA INVESTIGACIÓN (científico, social, económico u otros (máximo una carilla))

Impacto Económico y social.

El diseño e implementación de modelos de optimización de ayuda a la decisión en sistemas de transporte público permite mejorar los niveles de eficiencia tanto en el



proceso de planificación estratégica como en el proceso de planificación operacional. Modelos basados en programación lineal entera han sido probados con éxito en distintos trabajos reportados en la literatura especializada [1,2,3]. Específicamente en la primera fase de la planificación operacional, una adecuada asignación de la flota generará un impacto económico y social inmediato, pues permitirá reducir los costos totales de operación, mejorar la productividad, monitorear los riesgos, administrar los combustibles o identificar posibles inconvenientes. Esta práctica permite aprovechar al máximo el uso adecuado de los vehículos y posibilita al administrador controlar los hábitos de conducción individuales de sus conductores, así como la recopilación de información crítica sobre el estado de la flota.

Finalmente, los resultados del presente proyecto podrían ser adaptados a las condiciones presentes en el mayor proyecto de movilidad que la ciudad ha emprendido hasta el momento, el Metro de Quito.

Impacto Científico

El presente proyecto permitirá continuar con el trabajo desarrollado en el proceso de optimización del Sistema de Transporte de Quito en los últimos años, donde varios artículos han sido publicados [6,7]. Además, el impacto del proyecto será visualizado en el fortalecimiento del grupo de investigación en *Optimización Discreta y Combinatoria* ODCOR, en la línea de investigación Optimización en transporte y logística del Departamento de Matemática al incrementar su producción científica.

Por otra parte, la ejecución del proyecto apoyará además la formación de nuevo talento humano especializado en el área de la optimización discreta, a través de la posible vinculación de un estudiante de pre-grado para desarrollar su tesis en el marco del proyecto.

A mediano plazo, el proyecto permitirá ampliar el estudio del proceso de optimización del sistema de transporte de Quito mediante la generación de los datos de entrada para futuros proyectos de investigación enfocados en el problema de asignación de conductores, el problema integrado de asignación de flota y conductores, entre otros.

k. ESTADO DEL ARTE, E INVESTIGACIONES PREVIAS DEL EQUIPO *(máximo tres carillas)*

El proceso de planificación de un sistema de transporte público consiste de algunos problemas de optimización resueltos en forma secuencial: diseño de la red, planificación de líneas y frecuencias, diseño del diagrama de marcha, asignación de flota y asignación de conductores [1,2]. Los tres primeros se enmarcan dentro de la planificación estratégica, mientras que los problemas restantes son incluidos en el proceso de planificación operacional. Los problemas asociados al proceso de planificación estratégica han sido ampliamente estudiados y muchos trabajos han sido reportados previamente en la literatura. Amplias recopilaciones bibliográficas pueden ser encontradas en [3, 4, 5]. Para



el caso ecuatoriano, el problema de planificación de líneas y frecuencias es estudiado en [6], donde los autores analizan el problema para topologías especiales (camino y árboles) derivados del sistema de Trolebús. Basados en el mismo sistema de transporte, en [7] se reportan resultados relacionados al problema integrado de planificación de líneas y enrutamiento de pasajeros.

En el presente proyecto se pretende estudiar el primer problema asociado a la planificación operacional, el problema de asignación de flota. Dicho problema ha sido un importante campo de investigación de la optimización combinatoria durante los últimos años, donde formulaciones con miles de variables y restricciones han sido reportados. Parámetros como el número de depósitos que dispone el operador o si existen varios tipos de vehículos en el sistema afectan a la complejidad del problema. Por ejemplo, si el sistema de transporte dispone únicamente de un solo depósito y un solo tipo de vehículo, el problema de asignación de flota puede ser resuelto en tiempo polinomial usando algoritmos basados en el problema de asignación [8], en el problema de transporte [9], en el problema de flujo de costo mínimo [10] o en el problema de emparejamiento [11]. Por otro lado, para el resto de variantes el problema es NP-completo [11].

Uno de los problemas más estudiados en la literatura es el de asignación de flota con varios depósitos (MDVSP). Debido a la complejidad computacional, métodos heurísticos han sido considerados para resolverlo. Bertossi et al. [13] reportaron una heurística basada en la relajación Lagrangeana resolviendo instancias sobre los 50 viajes y 3 depósitos. Dell Amico, Fishetti y Toth [14] propusieron un nuevo método heurístico garantizando siempre soluciones que usan el menor número de vehículos. Este último trabajo reporta instancias de mayor tamaño, resolviendo problemas con sobre los 500 viajes y 4 depósitos. Gintner et al. [15] presentan un método heurístico basado en un fijado de variables, obteniendo soluciones cercanas al óptimo y reportando resultados sobre instancias reales con 8 depósitos y 11,062 viajes. Pepin et al. [16] informaron de cinco diferentes heurísticas basadas en métodos exactos truncados como generación de columnas, branch & bound o branch & cut. Laurent and Hao [17] propusieron un método de búsqueda local usando la idea de generar movimientos de bloques de viajes.

Por otro lado, el problema MDVSP ha sido enfrentado también mediante un enfoque exacto. Así, Robeiro y Soumis [12] modelaron el problema MDVSP como un problema de particionamiento de conjuntos, cuya relajación lineal es resuelta mediante generación de columnas. Löbel [18,19] consideró un método exacto usando un algoritmo tipo branch & cut el cual resolvió instancias de gran tamaño (28.000 viajes) incluyendo varios depósitos y tipos de vehículos. Hadjar et al. [23] proponen un algoritmo exacto combinando generación de columnas, fijado de variables y planos cortantes para el problema MDVSP. En [20], Haase et al. introducen una formulación basada en generación de columnas junto con un esquema tipo Branch & Bound para una versión simplificada del problema integrado de asignación de flota y conductores. En forma similar, Freling et al. [21,22] presentan algunas formulaciones para la versión integrada junto con métodos de solución basados en la relajación lagrangeana. Además, los autores presentan resultados computacionales asociados al sistema de transporte público de la ciudad de Rotterdam.

Referencias bibliográficas



- [1] Ibarra-Rojas, O.J., Delgado, F., Giesen, R., Muñoz, J.C., 2015. Planning, operation, and control of bus transport systems: a literature review. *Transp. Res. Part B* 77, 38–75.
- [2] Ceder, A., 2007. *Public Transit Planning and Operation: Modeling, Practice and Behavior*. CRC press.
- [3] Valérie Guihaire and Jin-Kao Hao. Transit network design and scheduling: A global review. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 42(10):1251 – 1273, 2008.
- [4] Amedeo R. Odoni, Jean-Marc Rousseau, and Nigel H.M. Wilson. Chapter 5 models in urban and air transportation. In *Operations Research and The Public Sector*, volume 6 of *Handbooks in Operations Research and Management Science*, pages 107 – 150. Elsevier, 1994.
- [5] M. R. Bussieck, T. Winter, and U. T. Zimmermann. Discrete optimization in public rail transport. *Mathematical Programming*, 79(1):415–444, 1997
- [6] Luis M. Torres, Ramiro Torres, Marc Pfetsch and Ralf Borndörfer. Line Planning on Tree Networks with Applications to the Quito Trolebús System. *International Transactions in Operation Research*. Vol 18. Pag 455 - 472., 2011.
- [7] R. Torres. Line planning and passenger routing problem with application to the Quito transportation system. *International Journal of Mathematics in Operational Research*. 2021.
- [8] C. S. Orloff. Route constrained fleet scheduling. *Transportation Science*, 10(2):149-168, 1976.
- [9] B. Gavish and E. Shlifer. An approach for solving a class of transportation scheduling problems. *European Journal of Operational Research*, 3:122-134, 1978.
- [10] L. Bodin, B. Golden, A. Assad, and M. Ball. Routing and scheduling of vehicles and crews: the state of the art. *Computers & Operations Research*, 10(2):63-211, 1983.
- [11] A. Bertossi, P. Carraresi, and G. Gallo. On some matching problems arising in vehicle scheduling models. *Networks*, 17:271-281, 1987.
- [12] Riberio, C., Soumis, F., 1994. A column generation approach to the multiple-Depot vehicle scheduling problem. *Oper Res* 42 (1), 41–52.
- [13] Bertossi A., Carraresi P., Gallo G. 1987. On some matching problems Arising in Vehicle Scheduling Models. *Networks* 17, 271-281.
- [14] Dell'Amico, M., Fischetti, M., Toth, P., 1993. Heuristic algorithms for the multiple depot vehicle scheduling problem. *Manage. Sci.* 39 (1), 115–125.
- [15] Gintner, V., Kliwer, N., Suhl, L., 2005. Solving large multiple-depot multiple-vehicle-type bus scheduling problems in practice. *OR Spectrum* 27 (4), 507–523.



- [16] Pepin, A.S., Desaulniers, G., Hertz, A., Huisman, D., 2009. A comparison of five heuristics for the multiple depot vehicle scheduling problem. *J. Scheduling* . 12 (1), 17–30.
- [17] Laurent, B., Hao, J.-K., 2009. Iterated local search for the multiple depot vehicle scheduling problem. *Comput. Ind. Eng.* 57 (1), 277–286.
- [18] A. Löbel. Optimal vehicle scheduling in public transit. PhD thesis, Technische Universität Berlin, 1997.
- [19] A. Löbel. Vehicle scheduling in public transit and lagrangean pricing. *Management Science*, 44(12):1637–1650, 1998.
- [20] K. Haase, G. Desaulniers, and J. Desrosiers. Simultaneous vehicle and crew scheduling in urban mass transit systems. *Transportation Science*, 35(3):286–303, 2001.
- [21] R. Freling, D. Huisman, and A. P. M. Wagelmans. Models and algorithms for integration of vehicle and crew scheduling. *Journal of Scheduling*, 6(1):63–85, 2000.
- [22] R. Freling, Huisman D., and Wagelmans P. M. Applying an integrated approach to vehicle and crew scheduling in practice. In *Computer-Aided Scheduling of Public Transport*, pages 73–90, 2001.
- [23] Hadjar, O. Marcotte, and F. Soumis. A branch-and-cut algorithm for the multiple depot vehicle scheduling problem. *Operations Research*, 54:130–149, 2006.

Publicaciones relacionadas con el proyecto

- A. Miniguano Trujillo, F. Salazar, R. Torres, P. Arias, K. Sotomayor. An integer programming model to assign patients based on mental health impact for tele-psychotherapy intervention during the Covid-19 emergency. *Health Care Management Science*. 2021.
- R. Torres. Line planning and passenger routing problem with application to the Quito transportation system. *International Journal of Mathematics in Operational Research*. 2021.
- D. Recalde, R. Torres and P. Vaca. An exact approach for the multi-constraint graph partitioning problem. *EURO Journal on Computational Optimization*, 2020, 8(3-4), pp. 289–308.
- S. Gutiérrez., A. Trujillo., D. Recalde., L.M Torres., R. Torres. The integrated vehicle and pollster routing problem: preprint. 2019.
- D. Recalde, D. Severín, R. Torres and P.Vaca. An exact approach for the balanced k-way partitioning problem with weight constraints and its application to sports team realignment. *Journal of Combinatorial Optimization* 36(3), pp. 916-936. Springer Verlag. 2018.
- D. Recalde, D. Severín, R. Torres and P.Vaca. Balanced Partition of a Graph for Football Team Realignment in Ecuador. *Lecture Notes in Computer Science* 9849. Springer Verlag. LNCS. pp. 357-368, 2016.



- Recalde D., Torres R. and Vaca P. Scheduling the professional Ecuadorian football league by integer programming. Computers & Operations Research, Vol. 40(10), 2478-2484, 2013.
- Luis M. Torres, Ramiro Torres, Marc Pfetsch and Ralf Borndörfer. Line Planning on Tree Networks with Applications to the Quito Trolebús System. International Transactions in Operation Research. Vol 18. Pag 455 - 472, 2011.
- Luis M. Torres, Ramiro Torres, Marc Pfetsch and Ralf Borndörfer. Line Planning on Paths and Tree Networks with Applications to the Quito Trolebús System (Extended Abstract). In Proc. ATMOS 2008 - 8th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modeling, Optimization, and Systems, Dagstuhl Research Online Publication Server, 2008 DROPS Publication 1583 [ATMOS 2008 Proceedings].
- S. Gutiérrez, D. Recalde, F. Salazar, R. Torres, P. Vaca, A personnel assignment model for the Ecuadorian Police, EURO 2019.

I. DESCRIPCIÓN DETALLADA DEL PROYECTO, INCLUIDO METODOLOGÍA *(máximo tres carillas)*

La motivación de nuestra investigación es aportar en el estudio del problema MDVSP. MDVSP consiste en la asignación de una flota heterogénea y distribuida en distintos depósitos a un conjunto de viajes programados en el diagrama de despacho, tal que:

- cada viaje sea cubierto exactamente una sola vez,
- cada vehículo inicia en un depósito, cubre una secuencia de viajes compatibles, y retorna a un depósito,
- el número de vehículos usados no debe exceder la flota total disponible,

En el presente proyecto se pretende formular un modelo de programación lineal entera para resolver el problema MDVSP derivado del principal sistema de transporte público de la ciudad de Quito, el Sistema Trolebús. Además, un algoritmo exacto tipo Branch & Cut para resolver el mismo.

Los métodos, estrategias y resultados pueden ser extendidos al resto de corredores de la Empresa Pública Metropolitana de Transporte de Pasajeros de Quito (EPMTPQ) y al mayor proyecto de movilidad que se haya emprendido en el país, el metro de la ciudad de Quito.

La metodología que pretendemos emplear es común para proyectos similares de modelización matemática, y comprende las siguientes fases:

- Formulación de un modelo de programación lineal entera para el problema de asignación de flota en un sistema de transporte público.
- Estudio teórico del poliedro asociado al modelo de programación lineal entera formulado.
- Desarrollo de algoritmos exactos de solución para el modelo de optimización.



- Implementación computacional del algoritmo en el lenguaje de programación C++ usando el solver de programación entera GUROBI.
- Pruebas computacionales basadas en instancias reales para medir el desempeño del algoritmo.

Como resultado principal del proyecto, se espera generar un programa escrito en C++ de ayuda a la decisión para resolver el problema de asignación de flota aplicado al Sistema Trolebús. Además, se pretende producir un artículo científico o una exposición en un congreso internacional evaluado por pares con los resultados del presente proyecto.

m. INFRAESTRUCTURA Y EQUIPOS

- *Indicar la infraestructura y equipos **disponibles** para la ejecución del proyecto, con la ubicación actual de los mismos*

Infraestructura	Equipos	
	Nombre del Equipo	Ubicación del Equipo
Oficina ADM-7N-04	COMPUTADOR DE ESCRITORIO INTEGRADO. Código 29703839	Edificio N° 3, Departamento de Matemática, Oficina ADM-7N-04.
Oficina ADM-8N-03	COMPUTADOR DE ESCRITORIO INTEGRADO. Código 29703838	Edificio N° 3, Departamento de Matemática, Oficina ADM-8N-03.
	Laptop Lenovo ThinkPad	Oficina ADM-8N-03

