

Optimización de la Integración de Programación y Horarios de Autobuses Utilizando Modelos de Flujo de Redes

Santiago Páez, Fabián Beleño

^aUniversidad de los Andes,

Abstract

Los sistemas de transporte público urbano son esenciales para la movilidad en las áreas urbanas, reduciendo la congestión y mejorar el acceso al transporte. Sin embargo, la programación eficiente de horarios y la asignación de flotas de autobuses son procesos complejos debido a las restricciones operativas y la variabilidad en la demanda de pasajeros. Este estudio se enfoca en optimizar estos procesos mediante la integración de la programación de horarios y la asignación de autobuses utilizando modelos de flujo de redes. Esta integración permite una gestión más coordinada, optimizando simultáneamente rutas, horarios y la asignación de autobuses, lo cual ayuda a reducir los costos operativos y la necesidad de una flota extensa, al tiempo que mejora la puntualidad del servicio y la satisfacción del usuario.

La revisión de la literatura muestra que diversas estrategias de optimización, como modelos clásicos basados en grafos, enfoques para demanda variable, y modelos basados en zonas y en optimización robusta, abordan estos desafíos. Estos enfoques destacan la importancia de integrar la programación y la asignación de flotas para mejorar la eficiencia operativa y la experiencia del usuario. El uso de herramientas computacionales avanzadas y algoritmos genéticos también juega un papel crucial en la gestión de la complejidad y la variabilidad del sistema.

La justificación del estudio se basa en la necesidad de mejorar la movilidad urbana y la eficiencia operativa de los sistemas de transporte público. La optimización de estos sistemas puede reducir la dependencia del automóvil privado y descongestionar las vías, proporcionando opciones de transporte accesibles y de calidad. Implementar modelos de flujo de redes permite realizar ajustes dinámicos en función de la demanda, mejorando la flexibilidad del sistema y fomentando un mayor uso del transporte público. Este enfoque tiene implicaciones económicas, sociales y ambientales significativas.

El estudio busca optimizar la programación de autobuses para alinear la oferta de transporte con la demanda variable de pasajeros, minimizar los costos operativos y el tamaño de la flota, maximizar la satisfacción del pasajero y utilizar modelos de flujo de redes para integrar eficientemente la programación y asignación de autobuses, considerando todas las restricciones operativas, de demanda y medioambientales.

Keywords: Transporte publico, Optimización de horarios, Asignación de flotas, Modelos de flujo de redes, Costos operativos

1. Introduccion

Los sistemas de transporte público urbano desempeñan un papel clave en la movilidad de las áreas urbanas, ayudando a reducir problemas como la congestión de vehículos y el acceso desigual a opciones de transporte. En un mundo cada vez más dependiente a la movilidad vehicular, garantizar la eficiencia de los sistemas de transporte masivo, enfocándose en los sistemas de autobús, es fundamental para reducir los impactos negativos del tráfico. Sin embargo, existe una problemática que es a partir en la planificación y programación eficiente de los horarios de autobuses y la asignación de la flota, considerando las múltiples restricciones operativas y la demanda de pasajeros que varía constantemente. Este problema es bastante complejo ya que implica gestionar un sistema de recursos limitados, como autobuses, operadores y rutas, mientras se intenta satisfacer las demandas de transporte de los usuarios de manera eficiente. Las empresas de transporte se enfrentan a la dificultad de equilibrar sus costos operativos, tales como el mantenimiento de los vehículos y el combustible, con la necesidad de proporcionar

un servicio adecuado en términos de puntualidad y capacidad de los autobuses. Ante esta situación, se ha definido integrar la programación de horarios y la asignación de autobuses unificando estas soluciones de manera óptima. Anteriormente, estos problemas se han abordado de manera separada, lo que lleva a soluciones subóptimas debido a la mala coordinación entre los horarios de servicio y la asignación de la flota. Sin embargo, la reciente adopción de modelos de flujo de redes ha mostrado ser una manera eficiente de abordar este problema de manera integrada, lo que permite optimizar simultáneamente las rutas, los horarios y la asignación de autobuses de acuerdo con las restricciones y objetivos del sistema. El uso de modelos de flujo de redes es factible debido a su capacidad para modelar la estructura compleja de las redes de transporte urbano y manejar grandes cantidades de datos, como la demanda variable de pasajeros a lo largo del día y las características operativas del sistema. Estos modelos permiten no solo optimizar la asignación de recursos, sino también reducir los costos asociados con los trayectos vacíos, mejorar la puntualidad del servicio y minimizar el

tamaño de la flota sin afectar la calidad del servicio para los usuarios.

2. Revisión de la literatura relevante, estado del arte y marco teórico

La optimización de la programación y asignación de autobuses en sistemas de transporte público ha sido objeto de múltiples estudios debido a su impacto en la eficiencia operativa, reducción de costos, y mejora de la calidad del servicio. Estos estudios abordan el problema desde diferentes perspectivas, cada uno teniendo un enfoque diferente, incluyendo modelos de flujo de redes, que permiten gestionar la complejidad de las redes de transporte.

2.1. Modelos Clásicos de Optimización

Uno de los primeros enfoques en la optimización de redes de transporte fue propuesto por Mandl (1979), quien utilizó modelos basados en grafos para representar las rutas de autobuses. Aunque el trabajo inicial no contemplaba la variabilidad en la demanda ni las restricciones operativas complejas, su enfoque de minimización de tiempos de viaje mediante algoritmos de caminos más cortos, como el algoritmo de Dijkstra, sirvió de base para investigaciones más avanzadas. Estos estudios posteriores comenzaron a incorporar otros factores, como la demanda cambiante y las restricciones operativas que influyen directamente en la eficiencia del servicio.

Más adelante, Yu et al. (2018) en *Bus Scheduling and Dispatching System Optimization* propusieron un enfoque integrado para optimizar simultáneamente la programación de autobuses y la asignación de la flota, minimizando trayectos sin pasajeros y mejorando los tiempos del servicio. Este enfoque, que trata la programación y asignación como un problema único, reduce considerablemente los costos operativos al combinar la disponibilidad de autobuses con la demanda de los usuarios.

Por su parte, Gkiotsalitis(2020), en *Public Transport Planning and Operations: Mobility as a Service and Automated Driving*, exploran la integración de la automatización en el transporte público, como la conducción automatizada y los servicios de movilidad bajo demanda, lo que podría mejorar la eficiencia del sistema, especialmente en áreas urbanas densamente pobladas. Esta integración no solo permite optimizar la programación y asignación, sino que también ayuda a minimizar el uso de vehículos.

2.2. Optimización Bajo Demanda Variable

La demanda variable es un desafío importante en la planificación de sistemas de transporte. Varios estudios han propuesto soluciones que combinan la programación y la asignación de autobuses en tiempo real. Ahmed et al. (2019), en su artículo, plantea un modelo flexible que ajusta las rutas según la demanda con el paso del tiempo, utilizando algoritmos de optimización que minimizan el número de autobuses necesarios sin comprometer la calidad del servicio.

En un contexto más reducido, Muñoz et al. (2019), en *Optimization of Bus Dispatching and Scheduling in Urban Transport Systems*, también aborda el problema de la demanda variable, proponiendo modelos de programación de autobuses que consideran los picos de demanda y ajustan los horarios a estas demandas. Esto no solo mejora la eficiencia operativa, sino que también ayuda a reducir los costos durante las horas de menor demanda, optimizando el uso de la flota.

2.3. Optimización Basada en Zonas

El uso de modelos basados en zonas es un enfoque efectivo para la optimización de sistemas de transporte en áreas urbanas. Estos modelos agrupan las paradas de autobús en zonas geográficas, facilitando suplir de la demanda y mejorando la cobertura del servicio. Soares et al. (2019), en su artículo *Zone-Based Bus Fleet Optimization in Dense Urban Areas*, proponen una metodología para mejorar la cobertura y reducir los tiempos de espera mediante la asignación de autobuses a estas zonas de alta demanda, lo que es muy útil en ciudades grandes donde la demanda fluctúa según la ubicación.

Este enfoque es complementado por Gkiotsalitis(2020), quienes exploran cómo los servicios de movilidad bajo demanda y la planificación basada en zonas permiten una mayor flexibilidad en la asignación de recursos, mejorando tanto la cobertura como la eficiencia operativa. Este método no solo optimiza los costos, sino que también asegura que las frecuencias de los autobuses se ajusten a las necesidades de los pasajeros, garantizando un servicio más confiable.

2.4. Integración de la Programación de Horarios y Asignación de Flota

Uno de los avances más significativos en la optimización de sistemas de transporte es la integración de la programación de horarios y la asignación de la flota en un solo problema, en lugar de tratarlos de forma separada. Yu et al. (2018) propone un modelo en el que ambas dimensiones se optimizan simultáneamente, mejorando la eficiencia operativa y la satisfacción del usuario. La planificación integrada garantiza que los autobuses se utilicen de manera óptima y minimiza los trayectos sin pasajeros, a la vez que asegura la puntualidad.

Asimismo, Sohail et al. (2024), en *Optimizing Bus Fleet Allocation and Scheduling in Urban Transport Systems*, comprueban esta idea al demostrar que la integración de la asignación y programación de la flota reduce los costos operativos de manera significativa, al tiempo que se mejora la fiabilidad del servicio. Este enfoque asegura que los autobuses mantengan intervalos regulares, lo que es crucial para la calidad del servicio.

2.5. Algoritmos genéticos

Los algoritmos genéticos (AG) son técnicas de optimización basadas en procesos evolutivos como la selección natural, el cruce y la mutación. En el contexto de los sistemas de transporte público, los AG se utilizan para optimizar horarios de autobuses y la sincronización de señales de tráfico, donde múltiples restricciones y variables hacen que el problema sea difícil de resolver con métodos tradicionales. Estos algoritmos

permiten la creación de soluciones adaptativas que se ajustan a las fluctuaciones en la demanda de pasajeros y a las condiciones variables del tráfico. Wang et al. (2022) utilizaron AG en sistemas BRT para optimizar tanto la programación como la sincronización, logrando una mejora en la eficiencia operativa.

Los AG destacan en la capacidad de gestionar la variabilidad y la incertidumbre en los sistemas de transporte. Estos algoritmos permiten explorar un gran espacio de soluciones posibles, adaptándose dinámicamente a cambios en la demanda de pasajeros o en las condiciones del tráfico. Como se mencionó en el estudio de Xi Yu et al. (2024), el uso de AG resultó en una reducción significativa de los tiempos de espera de los pasajeros, además de mejorar la puntualidad del servicio.

A pesar de los buenos resultados obtenidos, los AG pueden quedarse cortos en cuanto a tiempos de computación, especialmente cuando el número de variables y restricciones crece exponencialmente. Si bien encuentran soluciones cercanas al óptimo, estas soluciones pueden no ser globalmente óptimas en todos los escenarios, lo que limita su capacidad para ofrecer resultados definitivos cuando se trabaja con sistemas extremadamente complejos o con muchas fluctuaciones en tiempo real.

2.6. Optimización Robusta

La optimización robusta se enfoca en la creación de soluciones que sean eficientes y viables bajo condiciones inciertas. En el contexto del transporte público, la incertidumbre proviene de factores como las fluctuaciones en la demanda de pasajeros o las condiciones del tráfico, que pueden variar considerablemente a lo largo del día. Este enfoque permite que el sistema mantenga su eficiencia operativa incluso en los peores escenarios posibles, como lo demuestran Wang et al. (2022), quienes utilizaron optimización robusta para garantizar que la programación y sincronización de autobuses en sistemas BRT funcionara eficientemente bajo diferentes condiciones de tráfico.

A diferencia de otros enfoques de optimización que buscan soluciones óptimas en un solo escenario promedio, la optimización robusta ofrece resiliencia, ya que considera una gama de escenarios posibles, incluyendo los más desfavorables. Esto resulta en una mayor fiabilidad del servicio y una reducción de los costos asociados a interrupciones o ineficiencias operativas.

Aunque la optimización robusta ofrece grandes ventajas al manejar la incertidumbre, también puede generar soluciones demasiado conservadoras. Al intentar abarcar una gama amplia de escenarios, a veces las soluciones robustas sacrifican eficiencia en situaciones más previsibles o comunes, lo que puede resultar en una subutilización de los recursos o en una optimización que no es tan efectiva en escenarios promedio.

2.7. Herramientas Computacionales

El uso de herramientas computacionales ha revolucionado la forma en que se abordan los problemas de optimización en sistemas de transporte público. Programas como PTV VISUM y EMME permiten a los planificadores ajustar las rutas y la asignación de autobuses en tiempo real, maximizando la eficiencia operativa y minimizando costos. Sohail et al. (2024) demuestran que la aplicación de estos programas en sistemas de transporte urbano ha logrado mejoras significativas en la reducción

de costos y en la calidad del servicio, al permitir una respuesta dinámica ante la variabilidad de la demanda.

En el paper de Wang et al. (2022) sobre la optimización robusta en sistemas BRT: este estudio implementa los modelos utilizando herramientas avanzadas de programación como MATLAB. MATLAB es comúnmente utilizado para desarrollar los modelos matemáticos y realizar simulaciones, dado su robusto entorno para manejar problemas de optimización no lineales y multiobjetivo, lo cual es esencial en la programación de autobuses y la sincronización de señales.

En el trabajo de Xi Yu et al. (2024) sobre la optimización genética de la programación de autobuses, los autores también mencionan el uso de algoritmos genéticos implementados mediante herramientas computacionales especializadas en optimización, como Python con librerías de algoritmos evolutivos (por ejemplo, DEAP). Estas herramientas permiten una programación flexible y eficaz para explorar grandes espacios de soluciones y mejorar la eficiencia operativa del sistema de transporte.

3. Planteamiento del Problema y Justificación de su Relevancia

El transporte público urbano juega un papel fundamental en el funcionamiento de las ciudades, ofreciendo una alternativa eficiente y accesible ante la congestión vehicular y los problemas de movilidad que afectan a las áreas urbanas. Sin embargo, la programación eficiente de los horarios y la asignación de autobuses sigue siendo un desafío complejo para los planificadores de transporte. Esto se debe a una serie de factores que incluyen la cantidad limitada de vehículos disponibles, las restricciones operativas de las empresas de transporte, la variabilidad en la demanda de pasajeros y los costos asociados a la operación de la flota.

Uno de los principales problemas se basa en cómo optimizar la programación y la asignación de autobuses para satisfacer la demanda de pasajeros mientras se minimizan los costos operativos. Para esta problemática se requiere encontrar un balance entre la oferta de autobuses y la demanda de los usuarios en varios rangos de tiempo, teniendo en cuenta que la demanda varía significativamente durante las diferentes franjas horarias (picos y horas valle). Además, las restricciones operativas, como la necesidad de que los autobuses comiencen y terminen en el mismo depósito, los intervalos entre viajes, y las limitaciones de la flota disponible, añaden complejidad a la programación.

En el ámbito económico, el transporte público debe ser eficiente. La minimización de costos operativos, incluyendo los costos fijos, variables y los trayectos vacíos, es un aspecto crucial para las empresas de transporte. Desde el punto de vista de los usuarios, la satisfacción del pasajero depende en gran medida de factores como la frecuencia de los servicios, los tiempos de espera y la regularidad de los horarios. Un sistema de transporte que no garantice tiempos de espera razonables o una cobertura adecuada afectará la confianza del usuario y, por ende, la viabilidad económica del sistema.

3.1. Justificación

La optimización de los sistemas de transporte público es esencial para mejorar la movilidad y la eficiencia operativa. A medida que las ciudades crecen y se enfrentan a mayores problemas de tráfico, los sistemas de transporte público eficientes son la clave para reducir el uso de vehículos privados, descongestionar las vías y proporcionar opciones de transporte accesibles para los ciudadanos.

La integración de modelos basados en flujo de redes en la programación y asignación de autobuses es esencial, ya que permite abordar los diversos factores y restricciones de manera conjunta. Estos modelos proporcionan una visión más amplia del sistema de transporte, lo que permite realizar ajustes dinámicos en tiempo real según la demanda de pasajeros, mejorando la flexibilidad del sistema.

Además, la importancia de este proyecto radica en su capacidad para mejorar la calidad del servicio para los usuarios. Un sistema de autobuses que minimice los tiempos de espera y garantice intervalos regulares entre los viajes no solo aumentará la satisfacción del pasajero, sino que también fomentará un mayor uso del transporte público, reduciendo la dependencia del automóvil privado. Esto tiene implicaciones económicas, sociales y ambientales, lo que convierte a la optimización de estos sistemas en una prioridad para las políticas públicas.

3.2. Objetivos

- Optimización de la Programación de Autobuses: Desarrollar un modelo que permita programar los horarios de los autobuses de manera eficiente, alineando la oferta de transporte con la demanda variable de pasajeros durante el día.
- Minimización de Costos Operativos: Minimizar los costos asociados con la operación de la flota de autobuses, incluyendo los costos fijos (personal, mantenimiento) y los variables (combustible, desgaste), así como la reducción de trayectos vacíos.
- Reducción del Tamaño de la Flota: Desarrollar un modelo que permita minimizar el número de autobuses necesarios para satisfacer la demanda de transporte sin comprometer la calidad del servicio.
- Maximización de la Satisfacción del Pasajero: Garantizar que los tiempos de espera y los intervalos entre autobuses sean reducidos al mínimo posible, mejorando la experiencia del usuario y asegurando un servicio confiable y regular.
- Implementación de Modelos de Flujo de Redes: Utilizar modelos avanzados de flujo de redes para integrar la programación y asignación de autobuses, teniendo en cuenta todas las restricciones operativas, de demanda y medioambientales, y permitiendo realizar ajustes dinámicos en tiempo real.

References

- Wang, J., Han, Y., & Li, P. (2022). Integrated Robust Optimization of Scheduling and Signal Timing for Bus Rapid Transit. *Sustainability*, 14(16922).
- Xi Yu, Huan Cao, Ke Cao, Liang Zou, & Lingxiang Zhu. (2024). Considering the Optimization Design of Urban Bus Network Scheduling. *Applied Sciences*.
- Goldberg, D. E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Addison-Wesley.
- Gkiotsalitis, K., & Cats, O. (2020). Public Transport Planning and Operations: Mobility as a Service and Automated Driving. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 133, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2020.01.004>
- Muñoz, J. C., Giesen, R., & Ortúzar, J. D. (2019). Optimization of Bus Dispatching and Scheduling in Urban Transport Systems. *Transportation Science*, 53(2), 228-241. <https://doi.org/10.1287/trsc.2019.0915>
- Soares, J., Oliveira, R., & Maia, D. (2019). Zone-Based Bus Fleet Optimization in Dense Urban Areas. *Transportation Research Part B: Methodological*, 123, 285-300. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2018.10.012>