

Optimización de la Integración de Programación y Horarios de Autobuses: Aproximación de un solo deposito con múltiples líneas y un enfoque hacia el usuario

Estupiñan. MP^a, González. S,^b

^aDepartamento de Ingeniería Industrial, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.

^bDepartamento de Ingeniería civil y ambiental, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.

Resumen

Palabras Clave: Transporte publico, Programación de vehículos, operaciones, optimización, tiempos de espera

1. Introducción

Los sistemas de transporte publico cumplen una función vital en el desarrollo económico y en la competitividad regional de las ciudades. Un diseño integral de estos puede abatir múltiples externalidades del transporte congestión, contaminación, siniestralidad vial, entre otros y reducir considerablemente los costos de viaje de los usuarios. Sin embargo, en el entorno dinámico del transporte surgen desafíos complejos relacionados al diseño y operación de la red de servicio, donde de no ser tratados, derivan en ineficiencias para el operador de transporte y afectaciones hacia el usuario.

En América latina, a diferencia del norte global, el proceso de expansión urbana derivado de la rápida industrialización no ha sido acompañado por un progreso económico, social e institucional que certifique bienestar y desarrollo integro a sus ciudadanos (P. da Cunha & Rodriguez Vignoli, 2009). Estos fenómenos de hiperurbanización, han ejercido presión sobre los sistemas de transporte para que otorguen accesibilidad a oportunidades a partir de un diseño de un sistema con altos niveles de servicio y asequibilidad para los potenciales usuarios (Ibarra-Rojas et al., 2015). Sin embargo, acciones para la mejora de los sistemas, como la integración tecnológica en la operatividad, resultan ausentes en algunos casos de la región. En este articulo, Con el objetivo de evaluar la aplicabilidad del modelo desarrollado, sera estudiado el caso de **Movisinu**, la empresa operadora de transporte publico de Montería, Colombia.

1.1. Programación de horarios y vehículos en la red.

La eficiencia de los sistemas de transporte publico dependen principalmente de propiedades del diseño de la red y el plan operativo. En este marco de trabajo se tienen problemas como: el diseño de la red de servicio (TND), ajuste de frecuencia (FS), programación horaria de la red (TNT), programación de conductor (DSP) y la programación de vehículos (VSP) (Ibarra-Rojas et al., 2015). Los dos problemas que serán abarcados en este articulo están asociados a programación horaria de la red

y programación de vehículos. El problema de programación de vehículos de un solo deposito (SDVSP) consiste en la asignación de viajes a vehículos, que comparten el mismo terminal, con tal de cubrir la totalidad de los viajes minimizando los costos operativos (Ibarra-Rojas et al., 2015), mientras que, el problema de programación horaria de la red busca definir horarios de partida y llegada en los distintos nodos de la red, en este caso, satisfaciendo una frecuencia condicionada por los patrones de demanda y la capacidad del sistema (Ibarra-Rojas et al., 2015).

Los problemas de este tipo cuentan con múltiples actores y propiedades interdependientes que hacen que una aproximación integral sea ideal, sin embargo, la complejidad de cada uno de los subproblemas conlleva dificultades algorítmicas y computacionales (Ibarra-Rojas et al., 2015). Sumado a esto, la fluctuación de la demanda y la incertidumbre ante eventualidades que inciden en esta, también representan un reto. El ecosistema del transporte publico entonces esta compuesto por agentes, donde los **operadores buscan reducir costos operacionales, y los usuarios buscan reducir su costo generalizado de viaje**. Una configuración con mas buses en operación y una frecuencia mayor podría incrementar considerablemente el nivel de servicio, reducir tiempos de espera y mejorar la satisfacción del usuario, pero a su vez, también ejerce una gran carga sobre los costos operativos del operador del sistema (Meng et al., 2020). A partir de esto, surge el reto de reducir los costos operativos del sistema manteniendo un rango de nivel de servicio factible desde la perspectiva de los usuarios.

Nuestro estudio propone abarcar este conflicto bajo la **reducción de tiempos de espera en las estaciones buscando la maximización de satisfacción del usuario y estableciendo intervalos óptimos**. Esto a partir de la determinación de **tasas de llegada al sistema**, reconociendo el comportamiento **estocástico** de la demanda. El aporte de este estudio recae en la formulación de un problema que integra la programación horaria y asignación de vehículos reconociendo los comporta-

mientos fluctuantes de la demanda en distintas franjas horarias con restricciones de saturación por vehículo.

De esta manera en la **sección 2** se abarca una revisión de literatura extensa sobre los diferentes acercamientos a los problemas de tipo **TNT** y **VSP**. La **sección 3** plantea el problema y la configuración del caso de estudio. La **sección 4** presenta la formulación matemática del modelo y su solución. La **sección 5** presenta el experimento y análisis con el caso de estudio de Movisinu. Posteriormente, la **sección 6** presenta una discusión acerca del ejercicio realizado. Finalmente, la **sección 7** presenta conclusiones y recomendaciones futuras para el trabajo de los problemas de redes de flujo.

2. Revisión Literaria

El Problema de Programación de Horarios y Asignación de Vehículos en Redes de Transporte (**TNTSP**) presenta un desafío integral en la optimización de sistemas de transporte público, buscando equilibrar la **eficiencia operativa con la satisfacción del usuario**. Diversos estudios han abordado este problema desde ángulos complementarios, utilizando enfoques metodológicos innovadores para mejorar la gestión de horarios y vehículos.

Frente a la integración del nivel de servicio percibido por el usuario y la operación del sistema, **Valerie Guihaire et al. (2010)**, **Samuela Carosi et al. (2019)** y **Avishai (Avi) Ceder (2011)** presentan metodologías que buscan optimizar simultáneamente la **satisfacción del usuario y los costos operativos**. **Valerie Guihaire et al. (2010)** utilizan el algoritmo **Iterated Local Search (ILS)** para ajustar los horarios de salida de los vehículos, **optimizando las transferencias entre rutas, garantizando la uniformidad de los intervalos entre salidas y reduciendo los tiempos muertos**. En un enfoque paralelo, **Samuela Carosi et al. (2019)** aplican un modelamiento matemático que presenta similitudes con el de **Valerie Guihaire et al. (2010)**, sin embargo, para encontrar la solución óptima reducen el problema original aplicando **relajación lagrangiana y programación lineal**. Finalmente, **Avishai Ceder (2011)** desarrollan un método para construir horarios que combinan el concepto de intervalos y cargas uniformes, adaptados a vehículos de diferentes tamaños. El artículo propone una metodología para **equilibrar la demanda fluctuante y minimizar los costos operativos** ajustando horarios según la demanda acumulativa.

Liu Zhi-gang et al. (2004) proponen un modelo de **programación bi-nivel** para la operación regional de autobuses. En el nivel superior, minimizan tanto el **numero total de vehículos necesarios** como el **tiempo de los viajes de retorno**, mientras que en el nivel inferior optimizan la programación de horarios para reducir al mínimo el **tiempo total de transferencia de pasajeros** en las paradas de conexión. El artículo presenta el algoritmo **Bi-level Nesting Tabu Search (BNTS)** para optimizar la programación de autobuses en dos niveles y emplea el método **2-opt** para explorar nuevas soluciones al alterar pares

en las series de viajes y depósitos.

Los artículos de **James C et al. (2019)** y **Jing Teng et al. (2015)** abordan de manera individual el modelo de programación bi-nivel propuesto por **Liu Zhi-gang et al. (2004)**. El artículo de **James C et al. (2019)** plantea un modelo donde se minimiza el **tiempo total de transferencia de los pasajeros**, considerando el tiempo total de espera y el tiempo total de viaje. Utiliza un **algoritmo de estructura de árbol** para generar rutas, donde se enumeran según las técnicas de **partición de conjuntos** y las asigna a los vehículos, buscando un equilibrio entre los tiempos de viaje y de espera. Por otro lado, **Jing Teng et al. (2015)** abordan un problema de asignación de vehículos de un solo deposito para líneas (rutas) cruzadas (**SDVSP**), Tomando como función objetivo la minimización del **numero total de vehículos utilizados**. Su metodología se basa en la **teoría de clasificación de trabajos fijos** donde se transforma el problema en uno de ordenación de trabajos, modelando los vehículos como procesadores y los viajes como trabajos. Asimismo, (**Zhang et al., 2015**) proponen un modelo de intervalo fijo bajo un **algoritmo FIFO (First in first out)** para la programación óptima de vehículos con un solo deposito, donde también se toma un acercamiento de procesadores y trabajos.

El **tiempo de espera** es una variable critica en la programación de horarios y asignación de vehículos debido a su impacto en el costo generalizado de viaje y satisfacción del cliente. El artículo de **Omar J. et al. (2012)** aborda esta problemática optimizando los horarios para facilitar las transferencias y evitar la acumulación de autobuses en nodos clave, mediante el calculo de **ventanas de tiempo** y la aplicación del **Teorema de Sincronización**. **Andre de Palma et al. (2000)** amplía esta perspectiva considerando los **costos de demora** para los pasajeros que viajan antes o después de lo deseado, utilizando **modelos de linea y circular** para la optimización. El modelo de linea abarca versiones con **costos homogéneos y heterogéneos** según las necesidades de los pasajeros, mientras que el modelo circular ofrece **flexibilidad** con una programación que se repite cada 24 horas, permitiendo a los pasajeros ajustar sus horarios con mayor facilidad.

El **diseño de horarios y la asignación de vehículos** a menudo se realizan asumiendo el conocimiento previo de las **rutas de los usuarios**, aunque en realidad estas rutas dependen de horarios aun desconocidos. **Gilbert Laporte et al. (2017)** abordan este desafío integrando las elecciones de rutas de los usuarios para minimizar el **retraso programado**, el **numero de vehículos necesarios** y el **costo de las corridas de linea**, empleando el **método e-constraint** para la optimización multiobjetivo. Este enfoque de variabilidad en la selección de rutas también es explorado por **Mathias Michaelis et al. (2009)**, quien propone un método innovador para la planificación del transporte público. Su metodología se estructura en tres fases: **diseño de rutas, conversión a líneas operativas**, y **optimización de horarios** mediante **tecnicas de emparejamiento y ajustes iterativos** para mejorar la eficiencia y la satisfacción del usuario.

El problema de programación de vehículos varia según la **cantidad de depósitos** y las **características de la flota modelada**. En la actualidad, se han abarcado múltiples problemas que tratan la implementación de flotas eléctricas en los sistemas de transporte. El artículo de Amir Davatgari et al. (2024) se enfoca en la programación horaria de bloques operativos de buses en un solo patio de vehículos eléctricos (SDEVSP). Su objetivo es minimizar costos a través de la minimización de los **tiempos de no beneficio**, **reducir la flota** y **evaluar la viabilidad de la transición a la energía eléctrica**. Para ello, divide el problema en la programación de vehículos eléctricos y el problema de combinación de bloques (BCP), utilizando restricciones como la operación al día siguiente considerando los altos **tiempos de cargue de la tecnología verde**. El BCP se resuelve con algoritmos como Greedy, MILP, DaC y Simulated Annealing, y emplea bloques de viajes consecutivos para reducir la inactividad y el tamaño de la flota. Frente a este mismo paradigma, (Sharma et al., 2023) propone una aproximación **multi agente** donde buscan minimizar **costos de uso** y **costos de recarga** bajo el método de programación lineal entera mixta (MILP).

En contraste, los estudios de Huayan Shang et al. (2019), Benoit Laurent et al. (2008) y Sarang Kulkarni et al. (2018) abordan la programación de autobuses con múltiples depósitos y flota homogénea. Huayan Shang et al. (2019) optimizan el equilibrio entre **costos operativos** y **tiempos de espera** utilizando técnicas de flujo de red, **Deadheading** para trayectos vacíos y **Shifting Departure Time** para ajustar horarios y reducir la flota. Benoit Laurent et al. (2008) se centran en asignar vehículos a viajes comerciales para minimizar **costos totales**, utilizando el algoritmo de búsqueda local iterada (ILS) para ajustar soluciones iniciales y gestionar costos operativos y de transferencia. Sarang Kulkarni et al. (2018) optimizan el costo total bajo la aplicación de métodos de **generación de columnas** y **descomposición de inventarios** para modelar cada viaje que se recorre en la red, reduciendo el número de restricciones y variables, y así, mejorando la eficiencia en la resolución del problema maestro.

Para el problema de la programación de autobuses con múltiples depósitos y flota heterogénea (MVT-MDSPV), los estudios de Stephan Hassold et al. (2014), Lucie Desfontaines et al. (2017) y Avishai (Avi) Ceder et al. (2024) presentan metodologías integradas que consideran la **sustitución de vehículos**, la **cantidad de asientos vacíos**, la **capacidad de la flota**, los **tiempos de los pasajeros** y los **costos operativos**. Stephan Hassold et al. (2014) optimizan horarios de vehículos en una red de transporte mediante un **modelo de flujo de red en dos capas**, organizando conexiones y reflejando el comportamiento fluctuante de la demanda. Lucie Desfontaines et al. (2017) introducen una variante del Problema de Programación de Vehículos en Múltiples Depósitos (MDVSP) con Desplazamiento Controlado de Viajes (MDVSP-CTS), que ajusta ligeramente los horarios para reducir **costos operativos** sin sacrificar el **nivel de servicio**. Utilizan una **matheurística** de dos fases: heurística **degeneración de columnas** para desarrollar horarios iniciales y un **programa entero mixto** para ajustar estos horarios. Finalmente, Avishai (Avi) Ceder et al. (2024) presentan una meto-

dología basada en un modelo de flujo de red de costo mínimo para múltiples tipos de vehículos (MVT-VSP). Utilizan **horarios óptimos de Pareto** y ajustan la programación según la flota disponible, buscando minimizar los **costos operativos** mediante la optimización de la **elección y sustitución de vehículos**, y reduciendo **costos por tiempos de espera** y **asientos vacíos**.

Para la resolución del proyecto, fueron identificados cinco de los artículos revisados que proporcionan herramientas clave para el planteamiento del modelo matemático y la selección de la metodología a emplear. En primer lugar, definimos nuestra función objetivo, revisando la literatura existente. Con base en esta revisión, consideramos que es relevante enfocarnos en la satisfacción del usuario y la eficiencia del servicio. Los trabajos de Huan-Ya Shanga et al. (2020) y Yanping Liu (2019) ofrecen enfoques valiosos para medir la satisfacción del pasajero y evaluar la eficiencia del servicio. Ambos estudios consideran el tiempo de espera en las paradas de autobús como un factor clave en la satisfacción del usuario. Sin embargo, mientras que el estudio de Liu se centra únicamente en el tiempo en las paradas principales, nosotros consideramos relevante ampliar el enfoque para incluir también las paradas intermedias.

En cuanto a la eficiencia del servicio, se han propuesto diversas metodologías para optimizar la asignación y sincronización de autobuses. Shanga et al. (2020) utilizan el método de carga máxima para determinar la cantidad óptima de autobuses necesarios en función de la demanda de cada línea y la capacidad de los vehículos. Este enfoque se centra en ajustar la flota de autobuses según la demanda en diferentes momentos del día. Complementariamente, Avisha Ceder et al. (2011) emplean la función de déficit (DF) para minimizar la cantidad de vehículos. La DF calcula y visualiza la cantidad de vehículos requeridos en cada terminal a lo largo del tiempo, aumentando con cada salida de viaje y disminuyendo con cada llegada. Este enfoque permite identificar el número máximo de vehículos necesarios según la franja horaria y facilita la visualización de cómo se distribuyen las necesidades de vehículos a lo largo del día.

A pesar de que no implementamos la eficiencia del servicio como función objetivo, reconocemos la importancia de definir la frecuencia de los autobuses, ya que esto impactaría directamente en el tiempo de espera de los pasajeros. De los artículos revisados, tres destacan explícitamente el enfoque utilizado para definir el ciclo o frecuencia en el desarrollo de modelos matemáticos.

El estudio de Avishai Ceder et al. (2011) presenta un método para construir horarios con intervalos uniformes y vehículos de capacidad uniforme. Stephan Hassold et al. (2014) se enfoca en minimizar la desviación de los intervalos establecidos respecto a un intervalo uniforme deseado, así como la desviación de las cargas de pasajeros observadas respecto a un nivel uniforme deseado en el punto de máxima carga. Finalmente, João Paiva Fonseca (2018) utiliza un enfoque basado en un horario inicial cíclico para ajustar de manera precisa la oferta a la demanda fluctuante.

Para nuestro proyecto, optamos por definir una frecuencia de autobuses regular con una carga uniforme según franja horaria, lo que simplificaría la planificación de horarios, mejoraría la coordinación de los autobuses y optimizaría los recursos. De las metodologías propuestas en estos artículos, la única que se enfoca exclusivamente en garantizar la uniformidad de los intervalos es la metodología de Avishai Ceder et al. (2011). Esta metodología crea una curva acumulativa basada en la demanda de pasajeros y la carga observada a lo largo del tiempo, ajustando los horarios de salida de los autobuses a esta curva para asegurar intervalos y carga uniforme.

3. Planteamiento del problema y configuración del caso de estudio

El problema será aproximado a partir de la simulación de la operación diaria de un sistema de transporte público. En esta buscamos simular las condiciones operativas diferenciadas por tipo de día (Día hábil, no hábil) y por franja horaria (hora pico, hora valle). La función objetivo planteada busca maximizar la satisfacción del pasajero reduciendo los tiempos de espera, asegurando intervalos regulares de servicio y saturaciones óptimas en los vehículos. A partir de esta, planteamos un enfoque multiobjetivo donde se minimiza el costo generalizado de viajes de los pasajeros bajo la reducción del tiempo total de viaje, y además se optimizan los recursos del operador, bajo la utilización óptima de la capacidad de los buses. De esta manera, la programación de viajes podrá ser automatizada y responderá dinámicamente ante la incertidumbre en la demanda de los sistemas de transporte.

Bajo este planteamiento asumimos múltiples suposiciones que serán desarrolladas en el modelo:

- Un número fijo de vehículos se encuentra asignado a una ruta específica
- La frecuencia de salida de vehículos de depósito será regular según la franja horaria
- Los vehículos cuentan con un límite de minutos operativos (basado en el kilometraje) desde la salida del depósito.
- No es considerada la transferencia entre distintas rutas
- Con el objetivo de reconocer el comportamiento estocástico de la demanda, se definirán tasas de llegada a las estaciones por línea bajo los niveles de capacidad y solicitud actuales.
- Los tiempos de espera serán modelados a nivel estación bajo la tasa de llegada definida por modelos probabilísticos

Cabe mencionar que serán consideradas más suposiciones y restricciones conforme se formule matemáticamente el modelo

4. Formulación matemática del modelo

5. Caso de estudio

6. Resultados

7. Conclusiones

Referencias

- [1] Stephan H., Avishai C., 2014. Public transport vehicle scheduling featuring multiple vehicle types. *Transportation Research Part B*. 67, 129–143.
- [2] Samuela C., Antonio F., Laura G., Leopoldo G., Giuliano V., 2019. A matheuristic for integrated timetabling and vehicle scheduling. *Transportation Research Part B*. 127, 99–124.
- [3] Gilbert L., Francisco O., Miguel P., Justo P., 2017. Multi-objective integration of timetables, vehicle schedules and user routings in a transit network. *Transportation Research Part B*. 98, 94–112.
- [4] Valérie G., Jin-Kao H., 2010. Transit network timetabling and vehicle assignment for regulating authorities. *Computers and Industrial Engineering*. 59, 16–23.
- [5] Omar I., Yasmin R., 2012. Synchronization of bus timetabling. *Transportation Research Part B*. 46, 599–614.
- [6] James C., Kanticha K., Yu-Ting H., Hua-Yen W., 2019. Models and a solution algorithm for planning transfer synchronization of bus timetables. *Transportation Research Part E*. 131, 247–266.
- [7] Mathias M., Anita S., 2009. Integrating line planning, timetabling, and vehicle scheduling: a customer-oriented heuristic. *Springerlink*.
- [8] Gilbert L., Francisco O., Miguel P., Justo P., 2017. Multi-objective integration of timetables, vehicle schedules and user routings in a transit network. *Transportation Research Part B*. 98, 94–112.
- [9] André de P., Robin L., 2001. Optimal timetables for public transportation. *Transportation Research Part B*. 35, 789–813.
- [10] LIU Z., SHEN J., 2007. Regional Bus Operation Bi-level Programming Model Integrating Timetabling and Vehicle Scheduling. *Systems Engineering - Theory and Practice*. 27, 135–141.
- [11] Avishai C., 2011. Optimal Multi-Vehicle Type Transit Timetabling and Vehicle Scheduling. *Procedia Social and Behavioral Sciences*. 20, 19–30.
- [12] Hua-Yan S., Hai-Jun H., Wen-X., 2020. Bus timetabling considering passenger satisfaction: An empirical study in Beijing. *Computers & Industrial Engineering*. 135, 1155–1166.
- [13] Huayan S., Yanping L., Haijun H., and Renyong G., 2019. Vehicle Scheduling Optimization considering the Passenger Waiting Cost. *Hindawi, Journal of Advanced Transportation*, 1–13.
- [14] Ali H., Mohamadreza B., Kun-Hung C., 2001. A comparative analysis of bus transit. *Transportation Research Part B*. 37, 301–322.
- [15] João F., Evelien H., Roberto R., Allan L., 2018. A matheuristic for transfer synchronization through integrated timetabling and vehicle scheduling. *Transportation Research Part B - Q1*. 109, 128–149.
- [16] Ibarra-Rojas, O. J., Delgado, F., Giesen, R., Muñoz, J. C. (2015). Planning, operation, and control of bus transport systems: A literature review. In *Transportation Research Part B: Methodological* (Vol. 77). <https://doi.org/10.1016/j.trb.2015.03.002>
- [17] Meng, G., Lai, Y., Yang, F. (2020). An optimal bus scheduling model based on mixed-integer linear programming. <https://doi.org/10.1109/ITAIC49862.2020.9338826>
- [18] P. da Cunha, J. M., Rodríguez Vignoli, J. (2009). Crecimiento urbano y movilidad en América Latina. *Revista Latinoamericana de Población*, 3(4–5). <https://doi.org/10.31406/relap2009.v3.i1.n4-5.1>
- [19] Sharma, S., Bhattacharya, S., Kiran, D., Hu, B., Prandstetter, M., Azzopardi, B. (2023). Optimizing the Scheduling of Electrified Public Transport System in Malta. *Energies*, 16(13). <https://doi.org/10.3390/en16135073>
- [20] Zhang, J., Li, W., Qiu, F. (2015). Optimizing Single-Depot Vehicle Scheduling Problem: Fixed-Interval Model and Algorithm. *Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning, and Operations*, 19(3). <https://doi.org/10.1080/15472450.2013.836930>
- [21] Kulkarni, S., Krishnamoorthy, M., Ranade, A., Ernst, A. T., Patil, R. (2018). A new formulation and a column generation-based heuristic for the multiple depot vehicle scheduling problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, 118. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2018.11.007>

- [22] Davatgari, A., Cokyasar, T., Verbas, O., Mohammadian, A. (Kouros). (2024). Heuristic solutions to the single depot electric vehicle scheduling problem with next day operability constraints. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 163, 104656. <https://doi.org/10.1016/J.TRC.2024.104656>
- [23] Teng, J., Jin, S., Lai, X., Chen, S. (2015). Vehicle-scheduling model for operation based on single-depot. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/506794>