



Revista EIA, ISSN 1794-1237 /
e-ISSN 2463-0950
Año XVII/ Volumen 17/ Edición N.34
Julio-Diciembre de 2020
Reia34005 pág 1-12

Publicación científica semestral
Universidad EIA, Envigado, Colombia

**PARA CITAR ESTE ARTÍCULO /
TO REFERENCE THIS ARTICLE /**

Galindres Guancha, D.A.; Soto Mejía, J.A.; (2020). Modelo de asignación de demanda de pasajeros en un sistema de buses de tránsito rápido considerando la congestión del sistema y la percepción de comodidad del pasajero. Revista EIA, 17(34), Julio-Diciembre, Reia34005. <https://doi.org/10.24050/reia.v17i34.1250>

 *Autor de correspondencia:*

Galindres Guancha, D.A. (Diego Armando): Calle 18a N 9-97, Conjunto altos de Cipres, Apto 2 -7k, Manizales-Colombia. Teléfono: 3218567297. Correo electrónico: diegogal@utp.edu.co

Recibido: 1-06-2018

Aceptado: 18-06-2020

Disponible online: 09-08-2020

Modelo de asignación de demanda de pasajeros en un sistema de buses de tránsito rápido considerando la congestión del sistema y la percepción de comodidad del pasajero

 **DIEGO ARMANDO GALINDRES GUANCHA¹**
JOSE ADALBERTO SOTO MEJÍA¹

1. Universidad Tecnológica de Pereira, facultad de Ingeniería industrial

Resumen

Bus Rapid Transit (BRT) son Sistemas de Transporte Público que han ganado popularidad en el mundo. La complejidad de este tipo de sistemas, han hecho que sea necesario configurar estrategias basadas en modelos de optimización para la generación de frecuencias de despacho, tablas horarias, y modelos de control de flota en tiempo real. Sin embargo, la mayoría de los trabajos en donde se prueban los modelos desarrollados, no consideran cómo se distribuye la demanda en las rutas disponibles. En este trabajo se muestra el impacto generado en el perfil de carga de los buses, y el tiempo de espera promedio para cada ruta durante la operación, cuando varía el criterio con el cual los pasajeros escogen la ruta. En un primer escenario: Los pasajeros utilizan el servicio, teniendo sólo el objetivo de escoger la ruta que más rápido los lleve a su destino. En un segundo escenario, los pasajeros hacen una evaluación previa antes de abordar un bus factible para ellos. Esta evaluación consiste en tener en cuenta dos criterios: la comodidad dentro del bus y el tiempo que debe esperar para que llegue el siguiente bus.

Palabras clave: Bus de Tránsito Rápido (BRT), Modelo de Asignación de Pasajeros, Perfil de Carga, Tiempo de Espera.

Model Of Assignment Of Demand In A Brt System Considering The Congestion Of The System And The Perception Of Comfort Of The Passenger

Abstract

Bus Rapid Transit (BRT) are public transport systems that have gained popularity in the world. The complexity of this type of systems has made necessary to configure strategies based on optimization models for the generation of dispatch frequencies, time tables, and fleet control in real time context. However, most of the works where the developed models are tested, do not consider how the demand is distributed along the available routes. This work shows the impact generated in the load profile of the buses, and the average waiting time for each route during the operation, when the criterion with which the passengers choose the route varies. In a first scenario: The passengers use the service, having only the objective of choosing the fastest route to take them to their destination. In a second scenario, passengers make a prior evaluation before boarding a feasible bus for them. The evaluation consists of taking into account two criteria: the comfort inside the bus and the time that must be waited for the next bus to arrive.

Keywords: Bus Rapid Transit (BRT), Load Profile, Passenger Assignment Model, Waiting Time.

1. Introducción

Los sistemas de transporte son componentes fundamentales en la estructura socio-económica de un país. En las zonas urbanas, actualmente, juegan un rol imprescindible en la movilidad de las personas (Vidales and Daniel, 2005). Es por eso que el transporte público se ha convertido en una buena alternativa para evitar los problemas causados por los diferentes medios de transporte tales como saturación en las vías, polución y discriminación social (Abbas-Turki *et al.*, 2002). El modelo de BRT (*Bus Rapid Transit*), se ha promovido como una solución factible para los usuarios y los operadores, donde ya se ha demostrado su aplicabilidad y versatilidad con baja inversión inicial en comparación con otros medios de transporte como Metro o Tranvía (Leurent *et al.*, 2014). Los BRT se han aplicado en sistemas como Transmilenio (Bogotá, Colombia), Transantiago (Santiago, Chile) y Metro Rapid (Los Ángeles, CA) (Leiva *et al.*, 2010) para resolver el problema de la movilidad y la demanda de tránsito (Koehler *et al.*, 2011). No obstante, uno de los mayores desafíos es la planificación de este tipo de sistemas de transporte público, que consiste en asegurar un sistema operacional económicamente eficiente, adecuadamente integrado al entorno (Vidales and Daniel, 2005).

El hecho de que los pasajeros cotidianamente vivan situaciones de estrés, debido a que las condiciones no son muy favorables al viajar, como la espera excesiva y la saturación del sistema por la demanda acumulada en las estaciones, ha hecho que los mecanismos de planificación se conviertan en una herramienta muy útil para buscar mejorar estas condiciones, teniendo en cuenta que el costo operativo sea razonable y

que nuevas exigencias de los usuarios sean tenidas en cuenta (servicio rápido, confiable, amplia cobertura, y además sea económico) (Rohani *et al.*, 2013).

Por todo lo anterior, la planificación operativa es muy importante para una ciudad, ya que una mejora en ésta, repercute en la disminución de los tiempos de viaje esperados, impacta en la calidad y el costo del servicio, además, aumenta la confianza en sus usuarios y disminuye la posibilidad de preferir otro tipo de transporte. Así que el desarrollo del transporte público sea una de las prioridades de la administración pública, y también una de las vías más eficaces para resolver problema de movilidad. (Luhua *et al.*, 2011).

Conforme a lo anterior, la optimización de Redes de Transporte Público es probablemente una de las áreas con mayor auge en lo que a optimización de transporte público se refiere, (Ávila *et al.*, 2014), (Ceder, 2015), (Hernández *et al.*, 2015). Si bien el problema puede ser abordado desde distintas perspectivas y con diversas metodologías, hay consenso técnico en la importancia de contar con herramientas que permitan predecir correctamente el comportamiento de la demanda, ante cambios en las condiciones de la oferta del sistema en cada una de las estaciones, es decir la capacidad disponible de los buses.

La operación del Sistema de Transporte Público, Megabus de la ciudad de Pereira-Colombia, cuenta con estudios para estimar una matriz origen destino (Narváez and Mejía, 2016), donde se establece una aproximación de la tasa de llegada de los pasajeros y su posible destino. Además cuenta con modelos de optimización multiobjetivo que establecen intervalos óptimos de tiempo entre las salida de los buses articulados, de acuerdo a un nivel de demanda dado por un matriz origen-destino, buscando minimizar el tiempo de viaje promedio y el costo de la operación (Galindres *et al.*, 2017). Este tipo de modelos llevan implícito, un modelo que describe el comportamiento o flujo del volumen de los usuarios por las diferentes rutas del sistema. También se cuenta con un modelo de control de la flota en tiempo real, con el fin de evitar apelotonamientos (bus bunching) y garantizar cumplimiento de la programación (Ramírez *et al.*, 2015).

De acuerdo a lo anterior, establecer cómo la demanda de pasajeros interactúa con la oferta de servicios de buses disponible, teniendo en cuenta la aleatoriedad de los tiempos de llegada a cada una de las estaciones, se vuelve un factor sensible, y pertinente para entender los flujos de pasajeros que se transportan en cada ruta y poder así establecer, frecuencias óptimas de despacho, tablas de programación y modelos de control más ajustados a la variabilidad del volumen de pasajeros.

La interacción se refiere al comportamiento de los pasajeros, el cual varía de acuerdo con el grado de ocupación de los buses en el momento en que estos llegan a una estación dada, ya que las preferencias de los usuarios del sistema pueden cambiar, dejando a un lado el interés por llegar al destino en el menor tiempo posible y dando prioridad a la comodidad del viaje.

Los modelos de asignación de demanda básicos están basados en un supuesto común: cuando los usuarios necesitan viajar desde un origen a un destino, ellos escogen en una estación dada un subconjunto de rutas atractivas entre todas las disponibles para llevar a cabo su viaje, lo que se ha designado en la literatura como la elección de estrategia o hiperruta (Spiess and Florian, 1989). Sin embargo, en los modelos de demanda básicos, este supuesto implica que los pasajeros tienen un alto grado de conocimiento de la estructura y de las condiciones de operación de la red de transporte público, en términos de rutas y tiempos de viaje, desconociendo otros factores importantes como la percepción de comodidad del pasajero y la saturación de sistema al momento de abordar un bus.

Respecto de lo anterior, se puede observar que la principal dificultad es encontrar un modelo capaz de reproducir los volúmenes de flujo de pasajeros observados en las estaciones y, que también, pueda utilizarse como un modelo de predicción del comportamiento de la demanda ante cambios relevantes en la oferta de transporte público. Algunos autores como (Cats, 2011) han utilizado herramientas de simulación, que capturan en forma dinámica la operación de los sistemas y también la de los pasajeros. También, se han propuesto modelos alternativos basados en elección discreta, donde se presentan métodos tanto para generar conjuntos de líneas atractivas, como para la elección de otras rutas.

Según (Bouzaïene-Ayari *et al.*, 2001) existen principalmente tres tipos de modelos de asignación de pasajeros: los modelos aplicables a sistemas no congestionados, parcialmente congestionados, y enteramente congestionados. En los primeros, se considera que la congestión de las rutas no tiene ningún impacto sobre la distribución de pasajeros. En los segundos, sólo tienen en cuenta los tiempos de espera que se ven afectados por la congestión. Por último, en los sistemas enteramente congestionados la congestión repercute tanto en los tiempos de espera como en la distribución de pasajeros.

La saturación de los buses y el tiempo de espera, son factores claves que pueden modificar las decisiones de los usuarios al momento de elegir una ruta factible. Por tanto, la percepción de comodidad al viajar es importante al caracterizar el comportamiento de la demanda. (Hamdouch *et al.*, 2011) aumentan el realismo y la aplicabilidad del problema de asignación de tránsito distinguiendo entre viajeros sentados y de pie en su modelo de asignación de tránsito analítico de capacidad limitada. (Schmöcker *et al.*, 2008) propusieron una formulación que considera la capacidad de asientos disponibles en una red ampliada espacialmente, por medio de la cual los viajeros toman decisiones de elección de ruta basadas en la probabilidad de encontrar un asiento en diferentes rutas (es decir, el costo asociado a permanecer de pie en un vehículo de tránsito es diferente al de permanecer sentado en un vehículo durante el viaje). En este ámbito, proponen un modelo donde los pasajeros realizan elecciones de viaje utilizando estrategias, diferenciando niveles de comodidad entre pasajeros que viajan sentados y de pie y teniendo en cuenta la incertidumbre por obtener un asiento. Sin embargo, este tipo de formulaciones supone que el pasajero tiene un amplio conocimiento del sistema y la evolución del mismo, por lo que se necesita mucha información previa para estimar los parámetros que caracterizan los flujos de pasajeros en el sistema.

En este sentido, si bien no se discute la necesidad de contar con modelos de asignación de pasajeros dentro de los sistemas de transporte público, que reproduzcan de buena manera la distribución de flujos en los segmentos de calle o arcos de la red de transporte, si se debe afirmar que no son muchas las herramientas desarrolladas que entregan buenos resultados. Probablemente, la razón principal de lo anterior radica en que sólo en los últimos 20 años los investigadores han incorporado en los modelos de asignación de pasajeros, los efectos de la capacidad limitada que poseen los vehículos, el efecto de la saturación de los buses y los niveles de servicio en el cambio de comportamiento de usuarios. (Andradez and Felipe, 2014).

(Cea *et al.*, 1988) fueron los primeros en proponer un modelo de equilibrio del flujo de demanda basado en el concepto de ruta, como secuencia del itinerario de estaciones y paraderos, que incorpora la restricción de capacidad de los vehículos y con ello el fenómeno de la congestión, pero manteniendo constantes los tiempos de viaje en el vehículo. Posteriormente otros actores ampliaron el modelo incorporando la dependencia de los tiempos de viaje y de espera con el nivel de la demanda (Cominetti and Correa, 2001).

En una línea distinta, y bajo la premisa de que no es posible que todos los pasajeros tengan una percepción idéntica y precisa de los tiempos de viaje de cada ruta, se desarrollaron los modelos estocásticos de equilibrio (Yang and Lam, 2006), (Cepeda, 2006). En estos enfoques los pasajeros no buscan minimizar el tiempo esperado de viaje para alcanzar su destino, sino que abandonan cada parada según distribuciones de probabilidad de abordar los buses de cada línea, las cuales dependen de la diferencia entre el tiempo de viaje en ella y el tiempo total esperado de viaje. Este tipo de modelos, son útiles para comprender el comportamiento de pasajeros sin tener estudios previos precisos, con el fin de evidenciar como es la evolución del sistema en algunas variables observadas tales como, la capacidad disponible y el número de pasajeros que se transportan en cada ruta.

En (Leurent *et al.*, 2014) se propone un modelo donde la asignación de pasajeros a las rutas depende del tráfico de pasajeros, el tráfico de vehículos, la capacidad de los vehículos y la comodidad al interior de los vehículos. Este modelo tiene en cuenta la saturación del sistema y el cambio de tiempos de viaje de acuerdo, a la cantidad de vehículos en la malla vial para relacionar los tiempos de espera en las plataformas del sistema de transporte. Este modelo es una ampliación del modelo conocido como asignación de tránsito con capacidades en el cual se determina el flujo de pasajeros en dos niveles, el nivel inferior tiene que ver con las interacciones entre vehículos y pasajeros, mientras que el nivel superior tiene que ver con la selección de la ruta por parte de los pasajeros según la frecuencia de las rutas que le sirvan a cada pasajero. En sistemas tipo BRT no se necesita contemplar la saturación de la malla vial por tener carriles exclusivos e independientes. Además, al desconocerse el comportamiento de la demanda, la decisión de cada pasajero está condicionada a su tiempo de llegada, al tiempo que lleva esperando en el sistema y a la capacidad disponible del bus, lo cual hace de interés el modelo propuesto en el presente artículo.

Así, el presente trabajo propone un modelo de equilibrio para la asignación de pasajeros en una red de transporte público con carril exclusivo (BRT) y demanda conocida basado en un concepto de Estrategia. Esta última busca lograr que el pasajero logre en el menor tiempo posible alcanzar su destino y además pueda tener en consideración la congestión del sistema y su percepción de comodidad en la toma de su decisión de ruta de viaje.

El modelo estocástico propuesto permite capturar el comportamiento de los pasajeros en dos escenarios posibles. En el primero, los pasajeros escogen la ruta que van a utilizar teniendo en cuenta un solo factor de decisión (menor distancia por recorrer). En el segundo, además de considerar la menor distancia a recorrer el pasajero tiene en cuenta el estado de saturación del sistema (percepción de comodidad) y el tiempo que lleva esperando para decidir si se sube al primer bus factible, o espera por el siguiente.

2. Materiales y métodos

Para el desarrollo de la metodología propuesta en este documento se tiene en cuenta que:

1. El sistema está compuesto por las rutas 2 y 3 del sistema BRT Megabus en Pereira
2. No son posibles los adelantos entre los buses articulados.
3. Se supone que se conoce la capacidad disponible de cada bus en cualquier momento.
4. Los tiempos entre salidas de cada una de las rutas.

5. Los flujos de llegada de pasajeros fueron estimados a través de una matriz Origen- Destino
6. Se supone que todos los pasajeros conocen la distancia más cercana hacia la estación destino
7. Los tiempos de abordaje y descenso se consideran contantes.

Modelo matemático propuesto

Sean las variables: E, ($e \in N = \{0, 1, 2, 3, \dots\}$) para denotar el número de la estación, B, ($b \in N = \{0, 1, 2, 3, \dots\}$) para denotar el número del bus (el bus que se despacha primero tiene números más pequeños) y R, ($r \in N = \{0, 1, 2, 3, \dots\}$) para denotar las rutas del sistema (en este caso solo hay dos rutas (2,3)). En la **Tabla 1** se muestra la notación y las variables establecidas y P, ($p \in N = \{0,1, 2, 3, \dots\}$) el número de pasajeros que van llegando al sistema.

TABLA 1. VARIABLES DEL MODELO DE DECISIÓN	
Símbolo	Significado
$TE_{i,j}^p$	Tiempo de espera actual del pasajero p, en la estación i con destino estación j, $i, j \in e$
$TA_{i,j}^p$	Tiempo de llegada del pasajero p, en la estación i con destino a la estación j, $i, j \in e$
$RF_{i,j}^p$	Ruta factible del pasajero p en la estación i con destino estación j
$TL_{i,j}^b$	Hora llegada del bus b a la estación i y qué pasa por la estación j
Cap_i^b	Capacidad del bus b al momento de llegar al estación i
TES_r	Tiempo entre salida de buses en la ruta r
$FC_{i,j}^p$	Factor de comodidad del pasajero p para la estación i con destino J
$FTE_{i,j}^p$	Factor tiempo de espera del pasajero p en la estación i destino a J
$D_{i,j}^p$	Decisión tomada por pasajero p en la estación i con destino a J
$HD_{i,j}^p$	Horizonte de decisión del pasajero p estación i destino J
E	Número de estaciones de la ruta bajo análisis.
B	Número de buses en la ruta bajo análisis.
P	Número de pasajeros en las estaciones.
$Rn_{i,j}^p$	Numero aleatorio con distribución uniforme entre 0 y HD
$Dist_{i,j}^r$	Distancia generalizada mínima entre la estaciones i, j, por cualquier ruta escogida, r
T	Tiempo de la llegada del bus a la estación
CapT	Capacidad de fábrica del bus

Para cada pasajero, existe al menos un trayecto disponible para alcanzar su objetivo, cada trayecto tiene asociado un costo, (distancia recorrida), teniendo en cuenta la topología real del sistema. Se asume que el comportamiento racional de los pasajeros hace que elijan la trayectoria con menor costo (menor distancia recorrida). En (Leurent *et al.*, 2014) a esta trayectoria escogida se la conoce como hiperpath.

Se asume que en la estación origen el pasajero conoce las rutas factibles posibles para alcanzar la estación destino. En este punto pueden ocurrir tres casos, en el primero, el pasajero solo tiene una ruta factible para elegir, en el segundo, el pasajero tiene dos rutas factibles, sin embargo, bajo el conocimiento del sistema, el pasajero conoce cual es más rápida, y esta ruta será la que por defecto el pasajero escogerá, y el tercer caso, también hay dos rutas factibles, y ambas son posibles puesto que representan la misma distancia a recorrer hacia la estación destino basando la decisión solo en la capacidad disponible del bus ($Dist_{i,j}^r$ es la distancia mínima escogida entre las estaciones i, j de la ruta r).

$$Dist_{i,j}^r = \min\{Dist_{i,j}^2, Dist_{i,j}^3\} \quad i, j \in E, \quad r = \{2,3\} \quad (1)$$

El factor de tiempo de espera se calcula haciendo una diferencia entre, el tiempo entre salida de buses de la ruta que ha elegido el pasajero ha elegido TES_r y el tiempo que lleva esperando ($T - TA_{i,j}^p$), así se calcula una razón que estará cercana a uno si el pasajero no lleva mucho tiempo esperando, por tanto, tendrá más probabilidad de esperar por el bus siguiente, sí el bus que primero llega a la estación está muy lleno como se observa en la ecuación siguiente:

$$FTE_{i,j}^p = \frac{TES_r - (T - TA_{i,j}^p)}{TES_r} \quad i, j \in E, \quad r = \{2,3\}, \quad p \in P \quad (2)$$

El factor comodidad está dado por la capacidad del bus b al momento de llegar a la estación i dividido entre la capacidad de fábrica del bus. $CapT$ es una constante ya que solo hay un tipo de bus con una capacidad de 160 pasajeros.

$$FC_{i,j}^p = \frac{Cap_i^b}{CapT} \quad i, j \in E, \quad r = \{2,3\}, \quad p \in P \quad (3)$$

Capacidad del bus b al momento de llegar a la estación i determina el factor de comodidad $FC_{i,j}^p$ este será cercano a 1 si el bus llega vacío, por tanto, determina una mayor probabilidad de que el usuario se suba a dicho bus.

Siguiendo a (Leurent *et al.*, 2014) la decisión es de dos niveles, en el primer nivel se elige la ruta, y en el segundo nivel, se elige el bus a abordar, dependiendo del horizonte de decisión compuesto por $FC_{i,j}^p + FTE_{i,j}^p$ donde la toma de decisiones de los pasajeros de acuerdo a un número aleatorio $Rn_{i,j}^p$ con distribución uniforme entre 0 y $HD_{i,j}^p$. Como se muestra en las **Ecuaciones (4), (5) y (6)**.

$$HD_{i,j}^p = FC_{i,j}^p + FTE_{i,j}^p \quad i, j \in E, \quad p \in P \quad (4)$$

Donde sí **(5)** se cumple, el usuario espera el siguiente bus

$$0 \leq Rn_{i,j}^p \leq FC_{i,j}^p \quad i, j \in E, \quad p \in P \quad (5)$$

Por el contrario, Sí **(6)** se cumple, el pasajero aborda el primer bus que llega.

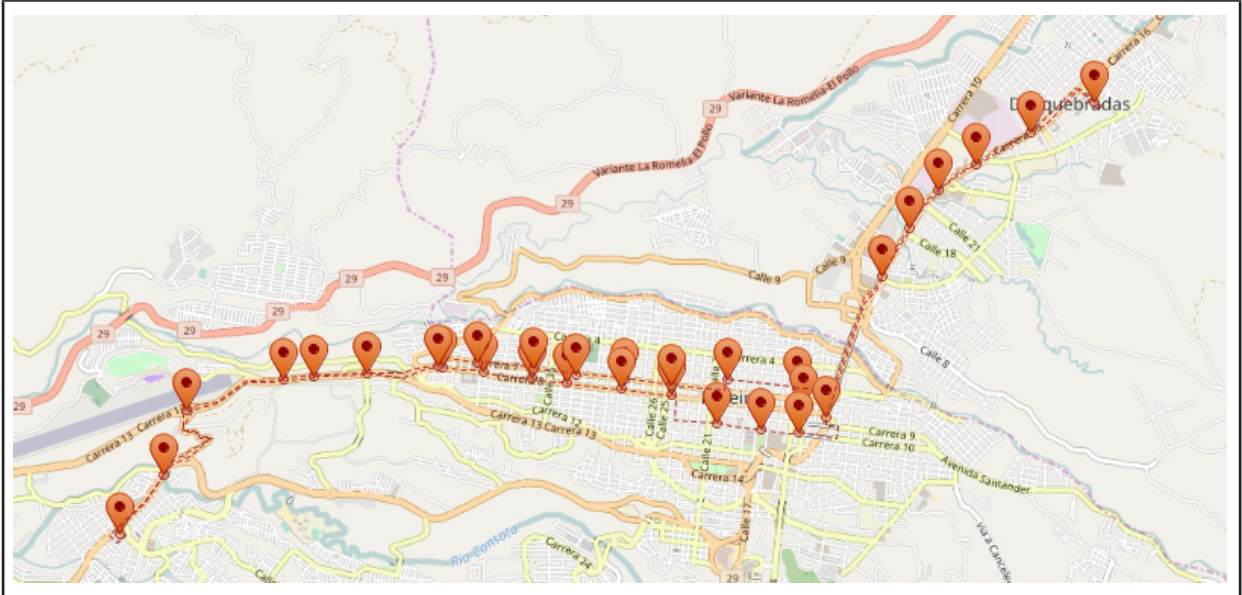
$$FC_{i,j}^p < Rn_{i,j}^p \leq FTE_{i,j}^p \quad i, j \in E, \quad p \in P \quad (6)$$

De esta forma la decisión de los pasajeros se basa en la situación actual del sistema y del tiempo de llegada a la estación.

3. Implementación de un simulador

Un simulador para el modelo de toma de decisiones se programó en la plataforma AnyLogic™. Un software que soporta simulación basada en agentes, donde cada uno de los componentes del sistema (Buses, estaciones, rutas, y pasajeros) son agentes que interactúan en un medio, en este caso el mapa Geo referenciado de la ciudad de Pereira.

Figura 1. Mapa ruta 2 y3 Megabus (Pereira - Risaralda). Elaboración propia con Open Street Maps (OSM).



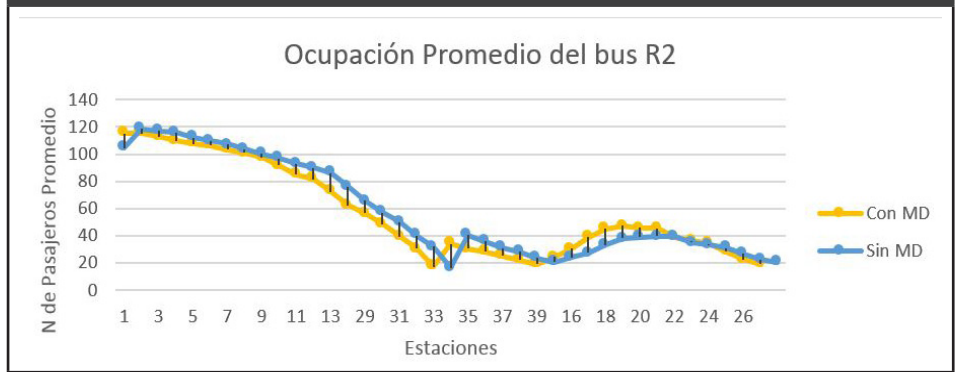
4. Experimentación, resultados y discusión

En esta sección se muestran los resultados obtenidos en la simulación y se explica la metodología seguida. En cada apartado se analiza una variable

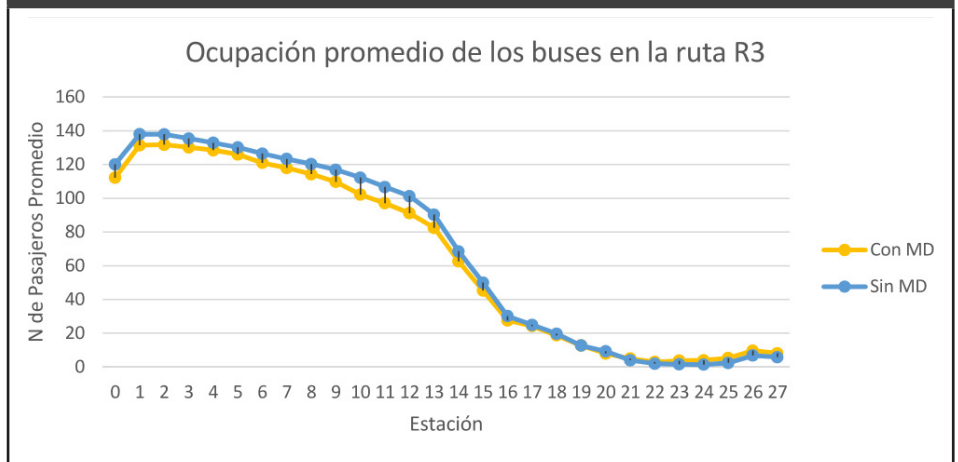
4.1 Tiempos de espera promedio por estaciones

Al calcular, la ocupación promedio de los buses a llegar a cada estación, en los dos escenarios (sin modelo de decisión Sin MD y con modelo de decisión Con MD), se puede observar, que al no tener un modelo decisión, la ocupación promedio de los buses es más alta (Ver **Gráfica 1**), dado que a los pasajeros no les importa si el bus va muy lleno o no, puesto que sólo tienen en cuenta, la distancia más corta para alcanzar su destino al establecer su ruta factible. Cuando existe un modelo de decisión, en donde los pasajeros hacen una comparación entre la comodidad de viaje tiempo que deben esperar adicional por otro bus, la ocupación promedio es menor, puesto que algunos pasajeros deciden no abordar los buses y esperar el siguiente, dándole prioridad a la comodidad. De esta forma se evidencia, que a pesar de haber sólo 2 rutas disponibles para todos los pasajeros del sistema simulado, los flujos a través de estas pueden variar de acuerdo a la saturación de pasajeros en el sistema.

Gráfica 1. Ocupación Promedio del bus en la ruta R2 para todas las estaciones

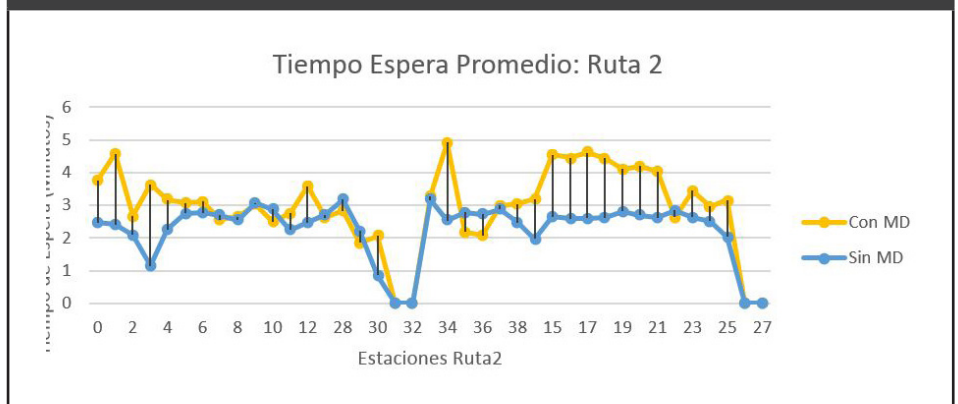


Gráfica 2. Ocupación Promedio del bus R3 para todas las estaciones

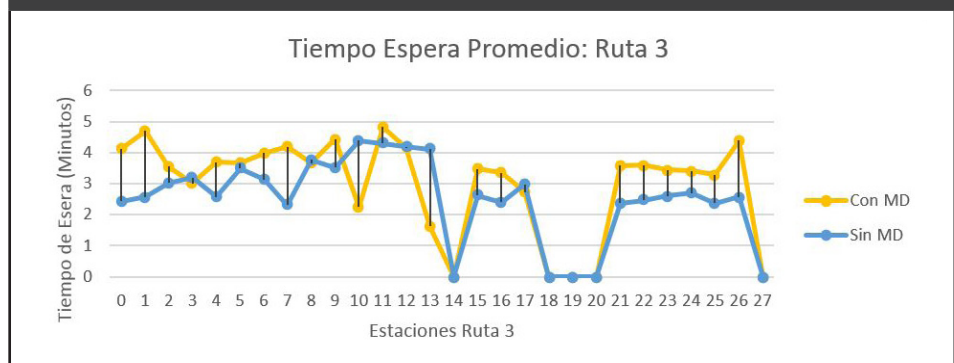


En las **Gráficas 1 y 2** se evidencia que la ocupación promedio de los buses disminuye cuando los pasajeros tienen un criterio de decisión en donde también tengan en cuenta el factor comodidad al viajar. Sin embargo, cuando el pasajero decide esperar por otro bus, los tiempos de espera promedio también van a aumentar, como se muestra en las siguientes **Gráficas 3 y 4**.

Gráfica 3. Tiempo de espera promedio en cada estación de la ruta 2



Gráfica 4. Tiempo de espera promedio en cada estación de la ruta 3



El escenario con modelo de toma de decisiones para los pasajeros, hace que el tiempo de espera promedio se incremente debido a que los usuarios no siempre que se suben el primer bus que les sirve, sino que también priorizan la comodidad sobre el afán de llegar antes a su destino.

Lo anterior evidencia que las estrategias de planeación de los sistemas de transporte público deben también tener en cuenta el criterio de los pasajeros al usar la oferta de viajes disponible, con el fin de lograr modelos más ajustados a la dinámica del transporte público y la interacción con los pasajeros que hacen uso del mismo.

5. Conclusiones y trabajos futuros

El flujo de pasajeros dentro de una red de transporte debe ser estudiado y analizado como un problema individual y no como un sub modelo al definir frecuencias óptimas, tablas de programación, e incluso modelos de control de flota en tiempo real. Dada la complejidad de las decisiones que toman los pasajeros, basadas en las características del sistema en un momento dado, como la capacidad disponible del bus al llegar a una estación y el tiempo que el pasajero lleva esperando, son complejos de formular en la toma de decisiones como modelo de optimización. En este caso, las herramientas más viables para reproducir los flujos aleatorios de pasajeros bajo unos niveles de servicio, son los modelos de simulación estocásticos. Estos permiten analizar la evolución del sistema sin necesidad de modelos complejos, captando la aleatoriedad de la toma de decisiones bajo ciertas circunstancias.

Se simuló y comparó dos escenarios. En el primero, los pasajeros sólo tienen en consideración el recorrer la menor distancia posible para alcanzar su destino. En el segundo, además de tener en cuenta la restricción de distancia, también consideran el factor de comodidad y tiempo de espera en la estación. Entre menor es la capacidad disponible con la cual un bus llega a una estación, menor es el factor de comodidad, aumentando la probabilidad de que el usuario espere la llegada de un siguiente bus. Por otra parte, el factor tiempo de espera, tomará un valor pequeño si el pasajero ya lleva mucho tiempo esperando en la estación, por lo que la probabilidad de continuar esperando por un segundo es baja.

Con el modelo de toma de decisiones se observa que la ocupación promedio de los buses que llegan a una estación disminuye,

Como trabajo futuro se está explorando el impacto que tiene el flujo de pasajeros (considerando la distancia más corta, la comodidad y tiempo de espera de estos), sobre la generación óptima de frecuencias de despacho, tablas horarias y mecanismos de control de flota.

Referencias

- Abbas-Turki, A., Grunder, O., Elmoudni, A., 2002. Public transportation systems: modeling and analysis based on a new Petri net approach, in: 2002 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Presented at the 2002 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, p. 6 pp. vol.4-. <https://doi.org/10.1109/ICSMC.2002.1173267>
- Andradez, P., Felipe, C., 2014. Formulación de un modelo de equilibrio estocástico para asignación de pasajeros en sistemas de transporte público. Repos. Académico - Univ. Chile.
- Ávila, P., Irarragorri, F., Caballero, R., 2014. A bi-objective model for the integrated frequency-timetabling problem. pp. 209–219. <https://doi.org/10.2495/UT140181>
- Bouzaïene-Ayari, B., Gendreau, M., Nguyen, S., 2001. Modeling Bus Stops in Transit Networks: A Survey and New Formulations. *Transp. Sci.* 35, 304–321. <https://doi.org/10.1287/trsc.35.3.304.10148>
- Cats, O., 2011. Dynamic Modelling of Transit Operations and Passenger Decisions.
- Cea, J.D., Larranaga, F., E, J., 1988. TRANSIT ASSIGNMENT TO MINIMAL ROUTES: AN EFFICIENT NEW ALGORITHM. *Doc. Trab. NO 57 ISSN0376-687X*.
- Ceder, A., 2015. *Public Transit Planning and Operation: Modeling, Practice and Behavior*, Second Edition. CRC Press.
- Cepeda, M., 2006. Un Nuevo Modelo para la Estimación del Tiempo de Espera en Paraderos de Transporte Público. *Obras Proy. Rev. Ing. Civ.* 36–44.
- Cominetti, R., Correa, J., 2001. Common-lines and passenger assignment in congested transit networks. *Transp. Sci.* 35, 250–267.
- Galindres, D., Soto, J., Estrada, S., 2017. Asignación de frecuencias óptimas, a través de un modelo multiobjetivo, para un sistema brt. *Rev. EIA* 13. <https://doi.org/10.24050/reia.v13i26.743>
- Hamdouch, Y., Ho, H.W., Sumalee, A., Wang, G., 2011. Schedule-based transit assignment model with vehicle capacity and seat availability. *Transp. Res. Part B Methodol.* 45, 1805–1830. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2011.07.010>
- Hernández, D., Muñoz, J.C., Giesen, R., Delgado, F., 2015. Analysis of real-time control strategies in a corridor with multiple bus services. *Transp. Res. Part B Methodol.* 78, 83–105. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2015.04.011>
- Koehler, L.A., Kraus, W., Camponogara, E., 2011. Iterative Quadratic Optimization for the Bus Holding Control Problem. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 12, 1568–1575. <https://doi.org/10.1109/TITS.2011.2164909>
- Leiva, C., Muñoz, J.C., Giesen, R., Larrain, H., 2010. Design of limited-stop services for an urban bus corridor with capacity constraints. *Transp. Res. Part B Methodol.* 44, 1186–1201. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2010.01.003>
- Leurent, F., Chandakas, E., Poulhès, A., 2014. A traffic assignment model for passenger transit on a capacitated network: Bi-layer framework, line sub-models and large-scale application. *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.* 47, 3–27. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2014.07.004>
- Luhua, S., Yin, H., Xinkai, J., 2011. Study on Method of Bus Service Frequency Optimal Model-Based on Genetic Algorithm. *Procedia Environ. Sci.*, 2011 3rd International Conference on Environmental Science and Information Application Technology ESIAT 2011 10, Part A, 869–874. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2011.09.139>
- Narváez, M.L.J., Mejía, J.A.S., 2016. Utilización de tarjetas inteligentes para estimar matrices origen-destino. Aplicación al sistema Megabús, Pereira. *Cienc. E Ing. Neogranadina* 26, 73–93.
- Ramírez, A., Soto, J.A., Orozco, Á., 2015. Bus rapid transit control system using restrictive holding and operating tables, in: 2015 CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON). Presented at the 2015 CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and

- Communication Technologies (CHILECON), pp. 141–148. <https://doi.org/10.1109/Chilecon.2015.7400366>
- Rohani, M.M., Wijeyesekera, D.C., Karim, A.T.A., 2013. Bus Operation, Quality Service and The Role of Bus Provider and Driver. *Procedia Eng., Malaysian Technical Universities Conference on Engineering & Technology 2012, MUCET 2012* 53, 167–178. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.02.022>
- Schmöcker, J.-D., Bell, M.G.H., Kurauchi, F., 2008. A quasi-dynamic capacity constrained frequency-based transit assignment model. *Transp. Res. Part B Methodol.* 42, 925–945. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2008.02.001>
- Spiess, H., Florian, M., 1989. Optimal strategies: A new assignment model for transit networks. *Transp. Res. Part B Methodol.* 23, 83–102. [https://doi.org/10.1016/0191-2615\(89\)90034-9](https://doi.org/10.1016/0191-2615(89)90034-9)
- Vidales, M., Daniel, A., 2005. Optimización de recorridos y frecuencias en sistemas de transporte público urbano colectivo.
- Yang, L., Lam, W., 2006. Probit-type reliability-based transit network assignment. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board* 154–163.