

**PI173-2-SMARTBRT**  
PLANEACIÓN DINÁMICA E INTELIGENTE DE RUTAS PARA SISTEMAS DE  
TRANSPORTE BRT

Juan David Páez Rivera

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE SISTEMAS Y COMPUTACIÓN  
BOGOTÁ, D.C.  
2017

**PI173-2-SMARTBRT**  
PLANEACIÓN DINÁMICA E INTELIGENTE DE RUTAS PARA  
SISTEMAS DE TRANSPORTE BRT

**Autor:**

Juan David Páez Rivera

MEMORIA DEL TRABAJO DE GRADO REALIZADO PARA CUMPLIR UNO  
DE LOS REQUISITOS PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
MAGÍSTER EN INGENIERÍA DE SISTEMAS Y COMPUTACIÓN

**Director**

Ingeniero Enrique González Guerrero PhD.

**Comité de Evaluación del Trabajo de Grado**

Nicolás Rincón García

Luis Guillermo Torres Ribero

**Página web del Trabajo de Grado**

<http://pegasus.javeriana.edu.co/~PI173-2-SmartBRT/>

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
MAESTRÍA EN INGENIERIA DE SISTEMAS Y COMPUTACIÓN  
BOGOTÁ, D.C.  
DICIEMBRE, 2017

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE SISTEMAS Y COMPUTACIÓN**

**Rector Magnífico**

Jorge Humberto Peláez, S.J.

**Decano Facultad de Ingeniería**

Ingeniero Jorge Luis Sánchez Téllez

**Director Maestría en Ingeniería de Sistemas y Computación**

Ingeniera Ángela Carrillo Ramos

**Director Departamento de Ingeniería de Sistemas**

Ingeniero Efraín Ortíz Pabón

**Artículo 23 de la Resolución No. 1 de Junio de 1946**

*“La Universidad no se hace responsable de los conceptos emitidos por sus alumnos en sus proyectos de grado. Sólo velará porque no se publique nada contrario al dogma y la moral católica y porque no contengan ataques o polémicas puramente personales. Antes bien, que se vean en ellos el anhelo de buscar la verdad y la Justicia”*

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero agradecer a mi familia por su apoyo incondicional en mi vida, a mis padres por formar la persona que hoy en día soy y por brindarme una educación ejemplar. Agradezco a mi director de trabajo de grado, el ingeniero Enrique González, por el acompañamiento y el conocimiento que me transmitió.

## CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>I. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO.....</b>	<b>2</b>
1. OPORTUNIDAD Y PROBLEMÁTICA.....	2
2. OBJETIVOS .....	4
2.1. Objetivo general .....	4
2.2. Objetivos específicos.....	4
3. METODOLOGÍA Y FASES DE DESARROLLO .....	4
<b>II. ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>6</b>
1. CONCEPTOS DE SISTEMAS DE TRANSPORTE PÚBLICO .....	6
1.1. Características de sistemas BRT .....	6
1.2. Planeación de servicios para sistemas de transporte público basados en buses .....	7
1.2.1. Modelos de demanda de transporte .....	7
1.2.2. Diseño de la red de rutas .....	9
1.2.3. Programación del servicio.....	9
1.2.4. Programación de los vehículos.....	10
1.2.5. Programación del personal .....	10
1.3. Calidad del servicio en transporte público .....	10
2. INTELIGENCIA ARTIFICIAL APLICADA A TRANSPORTE PÚBLICO .....	12
2.1. Sistemas inteligentes de transporte.....	12
2.2. Predicción y reconocimiento de patrones de movilidad urbana .....	13
2.3. Sistemas MultiAgente .....	14
3. CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN .....	15
<b>III. VISIÓN GENERAL DEL SISTEMA PROPUESTO.....</b>	<b>17</b>
1. VISIÓN GENERAL.....	17
2. OPERACIÓN DEL SISTEMA.....	19
3. CONSIDERACIONES.....	21
<b>IV. MODELO DE AGENTES.....</b>	<b>22</b>

1. METAS DEL SISTEMA .....	22
2. AGENTES .....	23
3. INTERACCIONES Y COOPERACIÓN .....	25
<b>V. INTELIGENCIA .....</b>	<b>28</b>
1. INFORMACIÓN DE MOVILIDAD .....	28
2. ANÁLISIS DE PATRONES DE MOVILIDAD .....	29
3. PREDICCIONES DE DESTINO DEL VIAJE.....	31
4. MEDIDAS DE CALIDAD DEL SERVICIO .....	33
5. FUNCIONES COSTO-BENEFICIO .....	34
6. SERVICIOS DE RUTA 100% DINÁMICA .....	37
7. REGLAS COMPLEMENTARIAS.....	37
<b>VI. IMPLEMENTACIÓN Y SIMULACIÓN .....</b>	<b>38</b>
1. SIMULADOR DE TRÁFICO .....	38
2. IMPLEMENTACIÓN .....	39
3. DETALLES RELEVANTES DE IMPLEMENTACIÓN.....	41
3.1. Algoritmo A* .....	41
3.2. Tiempo de ascenso, descenso y parada de bus .....	41
3.3. Planeación de servicios de ruta fija .....	41
4. DATOS SINTÉTICOS.....	42
<b>VII. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....</b>	<b>45</b>
1. PROTOCOLO EXPERIMENTAL .....	45
2. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	47
2.1. Tiempo de espera.....	47
2.2. Tiempo de viaje .....	50
2.3. Ocupación del bus .....	52
2.4. Consumo de combustible .....	53
2.5. Conflicto vehicular .....	54
<b>VIII. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO .....</b>	<b>56</b>

## ABSTRACT

*This work proposes the design and development of an express dynamic route planning and scheduling multi-agent system for bus rapid transit systems. The novelty of this proposal lies in the stochastic demand adaptation capabilities through a series of emerging strategies that lead to a sub-optimal local solution. The objective of the system is to collect real-time mobility information from the passengers to subsequently estimate travel patterns and principal origin-destination matrices. When passengers experience a low quality of service, the system reacts by initiating help protocols between agents, the final purpose is to add dynamic stops on the routes of the busses according to the system specific needs. The performance of the Smart-BRT system is assessed by mean of an experiment through a simulation of a corridor of Transmilenio BRT system in Bogotá city.*

## RESUMEN

*Este trabajo plantea el desarrollo de un sistema multiagente de planeación y programación dinámica de rutas express para sistemas de transporte BRT. La novedad de la propuesta reside en la capacidad de adaptarse al comportamiento estocástico de la demanda mediante estrategias emergentes que conllevan a obtener una solución sub-optima local. El objetivo del sistema es capturar información de movilidad de los pasajeros en tiempo real para posteriormente detectar patrones de viaje y principales pares origen-destino. Cuando se presenta un deterioro en la calidad de servicio, el sistema inicia protocolos de ayuda entre los agentes con el propósito de incorporar paradas dinámicas en las rutas de los buses de acuerdo a las necesidades del sistema. Para evaluar el desempeño del sistema Smart-BRT se aplica un protocolo experimental simulando una troncal del sistema Transmilenio de la ciudad de Bogotá.*



## RESUMEN EJECUTIVO

Este trabajo presenta Smart-BRT, un sistema inteligente enfocado en mejorar la operación de sistemas de transporte BRT y brindar una mejor calidad de servicio a sus usuarios. Los sistemas de transporte BRT combinan características de los sistemas basados en buses y los sistemas de rieles que les permiten contribuir a mejorar la movilidad de una ciudad con una baja inversión económica. Sin embargo, algunas de estas características también juegan en su contra conllevando a una baja satisfacción en los usuarios. Según encuestas de movilidad realizadas en la ciudad de Bogotá, los usuarios del sistema Transmilenio, uno de los principales referentes BRT a nivel mundial, se encuentran inconformes con la calidad del servicio, critican las bajas frecuencias de los buses, la inseguridad, la alta ocupación en estaciones y buses, los altos costos, los altos tiempos de espera, la contaminación, entre otros más. Desde nuestro punto de vista, la columna vertebral de la movilidad en una ciudad debería ser un sistema férreo, implementando energía limpia, con una alta capacidad de pasajeros y reduciendo los conflictos con otros tipos de sistemas de transporte de tal modo que se garantice una alta confiabilidad en los servicios. Por otro lado, los sistemas BRT deben brindar apoyo al sistema principal en zonas y corredores de alta demanda.

La propuesta de este sistema surge con el propósito de atacar dos problemáticas que se han evidenciado, los largos tiempos de espera y el sobrecupo en buses y estaciones. El trabajo propuesto plantea el desarrollo de un sistema multiagente de planeación y programación dinámica de rutas express en un sistema BRT. La novedad de la propuesta reside en la capacidad de adaptarse al comportamiento estocástico de la demanda por lo cual es necesario disponer de una estrategia que permita predecir o anticipar las variaciones que este pueda tener en función del tiempo. En la primera fase del proyecto se realiza una revisión del estado del arte, buscando comprender los elementos que inciden en la operación de un sistema basado en buses, los conceptos que integran los modelos de demanda de transporte y la calidad de servicio. Por otro lado se realiza una búsqueda de trabajos previos que apliquen técnicas de inteligencia artificial y sistemas multiagente para solucionar problemas de transporte, de esta manera se recopilaron moralejas para las fase posteriores.

La segunda fase abarca el diseño del sistema, se comenzó por establecer la conceptualización y visión general para luego aplicar la metodología AOPOA para el diseño de los agentes y la definición de los mecanismos de cooperación. Se definen los objetivos o metas del sistema en forma de jerarquía junto con las habilidades, recursos, precondiciones y tareas que permitan cumplir los objetivos propuestos. Finalmente, se obtiene la tabla de roles y tareas con la cual se hace el diseño de los agentes y la definición de vínculos y estrategias de cooperación. A continuación se estableció la inteligencia y procesos deliberativos de los agentes. En primera instancia, se exponen los mecanismos que permiten obtener información sensorial del mundo, posteriormente, se plantea el proceso de transformación de dicha información en conocimiento a través del análisis de patrones de movilidad. Este conocimiento se fusiona con información capturada en tiempo real con el fin de evaluar la calidad de servicio del sistema y determinar necesidades u oportunidades de mejora; es este análisis el que impulsa al agente a actuar de manera colaborativa. Finalmente, se detallan las funciones costo-beneficio, las cuales son clave dentro de los protocolos de cooperación, pues permiten seleccionar las acciones más favorables para los pasajeros y el sistema en general

En la última fase se realiza la implementación de software para posteriormente mediante un protocolo experimental evaluar el sistema Smart-BRT en relación a un sistema de referencia BRT normal. Para la adecuación del escenario de experimentación se tomó como caso de referencia el sistema Transmilenio de la ciudad de Bogotá.

Una conclusión general a la que se llegó es que se requiere mejorar el mecanismo de predicción de destino de viaje, pues la eficiencia del sistema está fuertemente ligada a este aspecto. En los casos donde se tiene información completa provista por el pasajero, se obtuvieron mejoras significativas inclusive similares a las de aumentar el número de buses un 20% en el sistema BRT de referencia. Las estrategias de servicios de ruta dinámica proveen mejoras en la calidad de servicio cuando se presentan conflictos como bloqueos en la vía. En cuanto a la ocupación de los buses se obtuvo que el sistema incrementa la ocupación en los buses, lo cual por un lado es bueno dado a que se aprovechan mejor los recursos de transporte, sin embargo, desde el punto de vista del pasajero se puede tener un impacto negativo dado a que reduce el confort. Hay que resaltar que la operación del sistema con Smart-BRT no generó consumo de combustible adicional al sistema de referencia. Como trabajo futuro se plantean mejoras en el algoritmo de predicción, mejoras en el simulador para poder incluir el comportamiento de las personas y finalmente la aplicación de un protocolo experimental riguroso para encontrar los mejores parámetros de configuración para el sistema.

## INTRODUCCIÓN

Como ciudadano y frecuente usuario del sistema de transporte Transmilenio de la ciudad de Bogotá, me inquietan las dificultades operativas por las cuales atraviesa el sistema y la baja calidad de servicio que ofrece a sus usuarios. En búsqueda de un posible aporte más allá de las críticas sin propósito, he decidido dedicar este proyecto a plantear una posible solución o contribución incipiente a la movilidad de la ciudad. Son muchos los autores que han estudiado problemas de transporte, sin embargo, dado que los sistemas BRT son algo recientes, aún falta mucho por investigar y proponer para poder optimizar su operación y mejorar la calidad de vida de los ciudadanos.

Es de pleno conocimiento que desde hace varios años el sistema ha decaído en popularidad debido a diversos factores [4], e inclusive hoy en día la situación sigue igual de mal o peor. Si bien son distintos los aspectos que aquejan a los usuarios del sistema, he decidido centrarme en dos en particular, los tiempos largos de espera y el sobrecupo en buses. A lo largo del día es común observar personas esperando en las paradas de bus por un servicio que los lleve a su destino a pesar de los diferentes buses que pasan derecho teniendo espacio disponible para llevar algunos usuarios. Es acá donde surge la idea de incorporar paradas adicionales en las rutas de los buses, paradas que inicialmente no están contempladas y que llamaremos dinámicas. Su propósito principal es el de brindar una mayor flexibilidad a los usuarios, permitiéndoles acceder al servicio de transporte cuando por diversas circunstancias el servicio que espera está retrasado.

Este esquema resulta interesante y un poco disruptivo debido a que va en contra del esquema clásico de planeación operativa mediante servicios de ruta fija los cuales son agendados o programados con bastante tiempo de antelación. Adicionalmente, la propuesta plantea el uso de rutas cuyo recorrido es determinado en tiempo real, este tipo de servicios los llamaremos servicios de ruta 100% dinámica y tienen como propósito atender grandes demandas de pasajeros entre un origen y destino sin ser previamente establecidos por la agencia de transporte, es decir, esto permite que el sistema reaccione de acuerdo a las necesidades de movilidad de las personas.

Para lograr un sistema robusto que integre las ideas planteadas anteriormente, es necesario disponer de las tecnologías de la información, y sobre todo, de esos elementos particulares que son la inteligencia artificial y los sistemas multiagente que han probado ser eficientes para abordar problemas de alta complejidad. Este trabajo presenta el proceso de concepción del sistema Smart-BRT, la conceptualización y desarrollo de la idea, el diseño de las estrategias, modelos y artefactos que lo componen, y por último la implementación en software y una evaluación mediante simulación tomando como caso de referencia el sistema Transmilenio de la ciudad de Bogotá.

## I. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

En este capítulo se presenta el marco general del desarrollo del proyecto de investigación comenzando con una descripción general de la problemática seguido de los objetivos y finalmente la metodología con sus respectivas fases.

### 1. Oportunidad y problemática

Los sistemas de transporte BRT han contribuido a la mejora de la movilidad urbana en distintas ciudades del mundo como Brasil, Colombia, México, Indonesia, China, Australia, entre otros. Funciona bajo la premisa de combinar la calidad de los sistemas de rieles y la flexibilidad de los buses para brindar un servicio de transporte rápido y de buena calidad. En comparación con otros sistemas masivos, el bajo costo y la rapidez de implementación son sus principales ventajas [1]. El sistema Transmilenio en la ciudad de Bogotá ha sido un referente importante a nivel mundial, su infraestructura obedece a los más altos estándares y exigencias llegando a soportar un estimado de 48.000 pasajeros por hora por dirección, el segundo más alto después de Rio de Janeiro. Respecto a demanda diaria de pasajeros ocupa el tercer lugar con un valor de 2.213.236 [2].

La calidad del servicio del sistema Transmilenio se ha venido deteriorando en los últimos años como consecuencia del crecimiento acelerado de la demanda. Inicialmente, se tenía estimado un volumen de 19.254 pasajeros por día por kilómetro de troncal; sin embargo, para el año 2009 ya se había alcanzado el 99% de este valor [3]. La encuesta realizada por la Cámara de comercio de Bogotá en el 2014 evidencia la baja satisfacción de los usuarios con el servicio, el cual obtuvo una calificación promedio de 2.5 sobre 5 puntos. Dentro de los aspectos positivos del sistema se reconoce la rapidez (con respecto a otras opciones de transporte) y dentro de los negativos sobresale el sobrecupo, la falta de buses y las bajas frecuencias de los servicios. El 91.1% de los usuarios encuestados considera que el servicio ha empeorado o que sigue igual de mal [4]. La insatisfacción ha conllevado a que los usuarios opten por otros medios de transporte privados como los automóviles, las motos o la bicicleta. En el caso de los dos primeros se tienen consecuencias negativas al incrementar el número de vehículos que transitan por las calles generando mayor congestión [5].

Según análisis de la Dirección de Gestión Urbana y Movilidad de la Cámara de Comercio de Bogotá y la Universidad de los Andes se han planteado una serie de desafíos para mejorar Transmilenio, los dos más importantes que inspiran este trabajo de investigación a realizar son: (i) mantener un control y revisión constante de las rutas para realizar ajustes pertinentes periódicamente teniendo en cuenta las condiciones variables del tráfico y la demanda, (ii) implementar medidas de bajo costo que busquen aumentar la capacidad del sistema utilizando eficientemente los recursos existentes [5]. En base a los estudios enunciados, se determina como problema central del trabajo a desarrollar, la reducción del tiempo de viaje de los usuarios y la disminución de la congestión de los buses en un sistema BRT. Como puntos clave para plantear una solución adecuada se hace énfasis en la planeación eficiente de rutas de acuerdo a la demanda de los pasajeros y a la optimización y uso eficiente de los recursos que comprenden el sistema.

Revisando la literatura se encuentran diferentes propuestas para optimizar sistemas de transporte; sin embargo, son pocos los que se enfocan en sistemas BRT [6]. Por ejemplo, Zhu [7] propone un esquema de priorización de circulación en intersecciones pero este tipo de aproximaciones no contempla la demanda de pasajeros. Dong et al. [8] plantea un control en tiempo real mediante reglas IF-THEN en base a la información recopilada por cámaras de video en las estaciones; sin embargo, carece de flexibilidad y adaptabilidad al usar reglas fijas. Wang et al. [9] sugiere un diseño multiagente de control, no obstante, se enfoca en las tareas, roles y organización pero no profundiza en un modelo de conocimiento que soporte las acciones de los agentes.

En la universidad Javeriana, L. Serrano propuso un modelo de cooperación basado en agentes para controlar el tráfico de buses y vehículos particulares en intersecciones semaforizadas [10], obteniendo en la simulación un incremento en la velocidad promedio de operación del 6%; sin embargo, el autor sugiere que los resultados deban ser comparados con otros sistemas, adicionalmente el tramo empleado en la simulación es muy corto lo cual puede omitir aspectos relevantes del problema. Rojas-Galeano expone en su trabajo [11] la debilidad del mecanismo actual de rutas estáticas al carecer de adaptabilidad a las condiciones cambiantes de la demanda de los usuarios. Para lograr esto, un aspecto importante, es la necesidad de herramientas automatizadas que permitan un análisis de la demanda de manera constante y confiable [12]. Los métodos clásicos de recopilación de información a través de encuestas y entrevistas suelen ser costosos [13], deben realizarse periódicamente, pueden verse influenciados por la subjetividad de los encuestados [14][15] o no logran ofrecer información de patrones y practicas espacio-temporales [16]. Es por esto que en los últimos años se ha venido desarrollando trabajos en análisis de la demanda mediante CDR [17], dispositivos móviles [18], [19] y estrategias de IoT [20] que debido a su potencial seguramente en unos pocos años serán implementados en diferentes sistemas de transporte en tiempo real. Otros trabajos en el área de la informática aplicados a sistemas diferentes al BRT implementan técnicas de inteligencia artificial para mejorar los tiempos de viaje [21], las rutas de los buses [22] y la frecuencia de los servicios [23]; sin embargo, estos trabajos tienen la debilidad de operar bajo el esquema de rutas estáticas y no contemplan el comportamiento estocástico de la demanda.

Teniendo en cuenta los diferentes avances enunciados anteriormente, se detecta el potencial de investigación para poder dar una solución integral a la problemática de largos tiempos de espera y sobrecupo. Si bien se ha dejado claro la importancia del análisis de la demanda, este trabajo no busca profundizar en este tema, sino más bien ubicarse un paso adelante y formular una solución que haga uso de las matrices origen-destino que estos mecanismos proveen. El trabajo propuesto plantea el desarrollo de un sistema multiagente de planeación y programación dinámica de rutas express en un sistema BRT. La novedad de la propuesta reside en la capacidad de adaptarse al comportamiento estocástico de la demanda por lo cual es necesario disponer de una estrategia que permita predecir o anticipar las variaciones que este pueda tener en función del tiempo. La propuesta de solución, al tener una característica dinámica en tiempo real, puede generar dudas en el lector en cuanto al impacto en los pasajeros respecto a cómo saben qué rutas y qué buses abordar, para ello, se han considerado herramientas como pantallas de información (que actualmente se han implementado en algunas estaciones) y el uso de dispositivos móviles con el fin de retroalimentar a los usuarios. Por otro lado, se tiene claro que actualmente existen dificultades a la hora de implementar la solución propuesta por cuestiones

tecnológicas, seguridad y privacidad de la información; sin embargo, se hace evidente la necesidad de obtener colaboración y participación de los ciudadanos para poder ofrecer mejores servicios a la comunidad. En la actualidad, las corrientes tecnológicas están orientándose a este tipo de iniciativas con el fin de que en un futuro cercano sean implementadas completamente.

## 2. Objetivos

A continuación, se indican el objetivo general y los objetivos específicos establecidos para el desarrollo del presente proyecto.

### 2.1. Objetivo general

Formular y evaluar un sistema inteligente de planeación y programación dinámica de rutas en tiempo real para sistemas de transporte BRT.

### 2.2. Objetivos específicos

1. Identificar los aspectos clave y las características de planeación y programación de rutas en sistemas BRT y el uso de sistemas inteligentes y sistemas multiagente para su control y optimización.
2. Diseñar un sistema multiagente para planeación y programación dinámica de rutas basado en predicción y análisis de patrones de movilidad urbana.
3. Validar el sistema planteado mediante análisis experimental y simulación de un tramo del sistema Transmilenio.

## 3. Metodología y fases de desarrollo

Para cumplir con los objetivos propuestos, el proyecto se divide en 3 fases: (1) Investigación y análisis, (2) Diseño, y (3) Validación. El proyecto se ejecuta bajo un esquema iterativo el cual permita realizar ajustes y correcciones en decisiones o errores detectados provenientes de fases previas. Siendo Transmilenio uno de los sistemas BRT de referencia a nivel mundial, se hace alusión a este de manera transversal en las distintas fases del proyecto, así mismo, se toma un tramo del sistema como prueba de concepto en la fase de validación.

La fase inicial comprende la caracterización y análisis del funcionamiento de sistemas BRT haciendo énfasis en el sistema Transmilenio de la ciudad de Bogotá. Se busca obtener información y estadísticas de la oferta y demanda tanto como de la operación del sistema en cuanto a planeación y programación de rutas. Adicionalmente, se recopila información que permita realizar una base teórica de técnicas de inteligencia artificial orientadas al reconocimiento de patrones y el uso de sistemas multiagente en el control de sistemas de transporte BRT. Una vez recopilada la información se procede a realizar una especificación de las características del servicio que debe ofrecer el sistema BRT de acuerdo a las necesidades y demanda de los usuarios.

En la segunda fase se construye el modelo de planeación y programación dinámica de rutas basado en análisis de patrones de movilidad urbana y se diseña el sistema multiagente que controle los buses. Para el sistema inteligente de predicción se hace énfasis en técnicas probabilísticas y de inteligencia computacional (sujeto a hallazgos de la fase de investigación y análisis) que sean capaces de predecir y generalizar las matrices origen-destino en el tiempo en función a un historial de matrices OD individual por usuario del sistema. Para el diseño del sistema multiagente se aplica la metodología AOPOA[24], una metodología orientada a agentes basada en una aproximación organizacional. Se sigue la fase de análisis donde las tareas y los roles son detectados, en este caso se plantean tareas y roles de predicción, planeación y control; la fase de diseño en donde se especifican las interacciones administradas a través de protocolos de cooperación principalmente entre los buses del sistema y finalmente la especificación de eventos y acciones asociados a cada rol. Adicionalmente, se hace uso de los mecanismos y artefactos propuestos por la metodología para representar el sistema. Finalizando esta segunda fase, se realiza un refinamiento de los modelos propuestos contrastándolos contra el caso de referencia Transmilenio, esto permite corregir posibles fallas e integrar nuevos elementos que mejoren su desempeño.

En la tercera y última fase se realiza la validación de los sistemas propuestos mediante simulación, para esto se toma como prueba de concepto el tramo de la troncal Norte-Caracas del sistema Transmilenio la cual contiene 28 estaciones desde el portal del norte hasta la estación de la avenida Jiménez. Según la literatura estos dos corredores (Caracas y Norte) poseen el mayor índice de pasajeros por hora por dirección y el mayor número de abordajes diario [2], características clave para evidenciar las problemáticas planteadas inicialmente y evaluar el sistema en condiciones de alta exigencia.

Para lograr una simulación apropiada del tramo seleccionado se hará uso de la información pública que provee la secretaria de movilidad y la empresa de transporte Transmilenio. Estos datos no evidencian el detalle específico de movilidad de la ciudad sino corresponden a estadísticas que generalizan aspectos clave de la operación y comportamiento de la demanda. A partir de estos se generarán datos sintéticos haciendo uso de técnicas probabilísticas que permitan tener una buena aproximación a las condiciones reales del sistema.

Esta tercera fase se divide en dos etapas, en la primera se lleva a cabo el desarrollo de la herramienta de software que implementa los modelos planteados y se integra con el simulador; en la segunda etapa se diseña y aplica el protocolo experimental, y posteriormente se realiza un análisis y se generan conclusiones. Es importante resaltar que en cada una de las fases se realizan refinamientos a los modelos propuestos conforme se identifiquen nuevos requerimientos, conceptos, técnicas y métodos en la medida en que evoluciona el desarrollo del trabajo.

## II. ESTADO DEL ARTE

Esta sección busca contextualizar al lector en temas que son clave en el desarrollo de esta investigación y que se abordan en capítulos posteriores. La primera parte brinda un panorama general de conceptos de planeación y operación de sistemas de transporte público basado en buses, posteriormente se hace una revisión de trabajos que abordan problemáticas de transporte mediante el uso de técnicas de inteligencia artificial. Finalmente, se realiza una discusión de las moralejas obtenidas de este proceso de revisión literaria.

### 1. Conceptos de sistemas de transporte público

Dentro de la revisión literaria de sistemas BRT se puede determinar que son pocos los autores y textos que en la actualidad presentan un detalle del funcionamiento de este tipo de sistemas, posiblemente debido al poco tiempo transcurrido desde sus primeras implementaciones. No obstante, se puede observar que este tipo de sistema recoge muchos de los conceptos de sistemas basados en buses por lo cual nos apoyaremos en ellos para el desarrollo de este trabajo. A continuación, se presentan las principales características de un sistema BRT seguido de dos elementos clave en la comprensión general en un sistema de transporte público que son: el diseño de servicios en un sistema de transporte público (haciendo énfasis en las actividades de (i) análisis y modelo de la demanda y (ii) programación de servicios) y conceptos generales en la calidad de servicio.

#### 1.1. Características de sistemas BRT

El termino BRT se refiere a sistemas de autobuses de tránsito rápido, una definición más completa extraída de Hook & Wright [1] nos dice: “Es un sistema de alta calidad basado en buses que proporcionan movilidad urbana rápida, cómoda y de relación favorable costo-beneficio a través de la provisión de infraestructura de carriles segregados, operación rápida y frecuente y excelencia en mercadeo y servicio al cliente”. Dentro de las características principales de los sistemas BRT se encuentran las siguientes:

- Infraestructura física: se compone de carriles segregados, corredores, estaciones y terminales.
- Operaciones: hace referencia a la capacidad de atender una gran demanda de pasajeros incluyendo el proceso de recaudo de dinero.
- Tecnología: vehículos de bajas emisiones y bajo ruido, tecnología automática de recaudo, gestión de operaciones mediante un centro de control, uso de sistemas inteligentes de transporte.
- Mercadeo y servicio al cliente: identidad distintiva del sistema, excelencia de servicio al cliente, facilidad de acceso entre otros.



## 1.2. Planeación de servicios para sistemas de transporte público basados en buses

El diseño completo de un sistema de transporte público aborda una gran cantidad de fases y actividades que desarrolla todo un equipo interdisciplinario de personas; todo el proceso resulta ser bastante amplio y complejo de abordar; para este trabajo se hará énfasis en las actividades específicas de planeación de operación del sistema. La operación de un sistema de transporte basado en buses se fundamenta en establecer un conjunto de servicios de transporte de acuerdo a las necesidades de desplazamiento de los potenciales usuarios. Estos servicios se componen de un trazado del recorrido que realizará el bus, una serie de paradas donde se permite el ascenso y descenso de pasajeros y la definición de horarios durante los cuales el servicio está disponible para los usuarios. Este mismo esquema también es la base de operación de los sistemas de tránsito rápido (BRT).

Según Ceder [25] el proceso de planeación de operación se puede descomponer en cuatro actividades: (1) diseño de la red de rutas (*network route design*), (2) programación del servicio (*timetable development*), (3) programación de los vehículos (*vehicle scheduling*), y (4) programación del personal (*crew scheduling*). A cada actividad le corresponde una serie de entradas necesarias para poder ser desarrollada y generar una salida la cual alimentará actividades posteriores o servirán para tomar decisiones a lo largo del proceso. Es necesario resaltar que estas actividades se soportan en la recolección y análisis de datos de movilidad, que por lo general se apoyan en censos, encuestas, conteos de tráfico, entre otras técnicas con las cuales se construye un modelo de demanda de transporte, este modelo es uno de los elementos imprescindibles en el proceso de planeación. A continuación, se hace una revisión general del proceso de planeación de operación comenzando con modelos de demanda de transporte y resaltando aquellos aspectos y actividades clave a considerar en el desarrollo del trabajo de investigación.

### 1.2.1. Modelos de demanda de transporte

El análisis y estudio de la demanda es clave en el diseño de un sistema de transporte y la planificación de sus operaciones, el objetivo es conocer las necesidades puntuales de los usuarios respecto a donde y cuando necesitan servicios de transporte [1]. Este tipo de información es de gran importancia para las actividades que se llevan a cabo en el proceso de planeación por lo cual es vital que los datos sean de buena calidad y reflejen el comportamiento real de la movilidad.

De acuerdo a Ortúzar [26][27], la demanda de transporte es derivada, es decir, las personas se movilizan de un origen a un destino en un tiempo del día determinado utilizando un modo de transporte con el propósito de realizar una actividad, por ejemplo, trabajar, estudiar, ir al médico, ir de compra, etc. Teniendo en cuenta esto, surge la necesidad de enmarcar dichos viajes en un modelo que facilite el estudio y análisis de la demanda, y que además, permita generar un marco sólido de trabajo para la planeación del sistema de transporte,

El modelo clásico de transporte es una de las herramientas que durante varios años ha permitido describir la demanda de movilidad. Este comprende una secuencia de cuatro etapas o sub-modelos: (1) generación de viajes, (2) distribución de viajes, (3) partición modal, y (4)

asignación de viajes; este modelo subdivide el territorio en zonas de análisis [27]. Cabe aclarar que este modelo no es específico de sistemas de transporte público basado en buses sino que por lo contrario describe la movilidad general de un territorio incluyendo todos los diversos modos de transporte.

En términos muy generales, en la etapa de generación de viajes se tiene como propósito determinar el número total de viajes que genera y que atrae cada una de las zonas de análisis. Para cada una de estas se obtiene información a través de conteos de viajes, censos, encuestas, entrevistas y datos de uso del suelo que permitan establecer una serie de atributos socioeconómicos de la zona. Estos atributos pueden ser: número de personas por hogar, nivel de ingresos, número de vehículos por hogar, estrato, área destinada a industria, comercio, recreación, estudio, entre otros. Posteriormente, a través de técnicas de regresión, se busca encontrar una relación entre los atributos de la zona y el número de viajes generados y atraídos. En la etapa de distribución de viajes el objetivo es determinar de dónde a dónde se realizan los viajes, es decir, para cada viaje se determina el origen y destino. Esto se logra a través del uso de una matriz origen-destino en diferentes niveles de agregación como puede ser tiempo, propósito del viaje, etc. En la construcción de la matriz se emplean diferentes métodos como maximización de la entropía, ajuste proporcional iterativo (IPFP), modelos gravitacionales, entre otros. En la tercera etapa se busca determinar qué modo de transporte es utilizado para realizar el viaje, para lo cual se determinan un conjunto de factores que influyen en el proceso de decisión de un individuo, como pueden ser: el poseer un vehículo privado, poseer una licencia de conducción, los ingresos, las características del viaje, la hora del día, la presencia de paraderos o estaciones de buses, seguridad, comodidad, cercanía, conveniencia, etc. Finalmente, en la última etapa se busca asignar los viajes a la red de infraestructura vial, es decir, determinar que trazado o recorrido utilizan determinadas personas para desplazarse. Principalmente se enfoca para modos de transporte privados donde se tiene más libertad para seleccionar la ruta a tomar para llegar a un destino. Usualmente, se hace uso de funciones de costo que llegan a un equilibrio cuando todos los individuos encuentran la mejor ruta de acuerdo a unas condiciones de tráfico e infraestructura determinadas [27].

Ceder [25] propone 3 conceptos clave para lograr un servicio de transporte exitoso: (i) recolección adecuada y comprensión de datos, (ii) uso de la información recolectada para planeación y toma de decisiones inteligente, (iii) uso de los planes y decisiones para llevar a cabo astutamente la operación y control. Se hace evidente la importancia de la recolección de datos y el análisis de los mismos pues son estos la base de la pirámide sobre la cual se desprenden las demás actividades en la planeación de un sistema de transporte. En la actualidad existen 3 categorías principales de técnicas empleadas en la recolección de datos de movilidad: (i) métodos manuales (ii) métodos automáticos y (iii) métodos AVL (localización automática de vehículos). Los métodos manuales son hoy en día los más utilizados, pero sin duda implican grandes inversiones de dinero y tiempo, por lo cual la frecuencia con que se actualizan dichos datos es baja. Recientemente, dados los avances tecnológicos en los últimos años se han venido desarrollando técnicas automáticas para recolectar información de movilidad individual de los habitantes de una ciudad mediante trazas de GPS, análisis de las redes de telecomunicaciones (CDR) y otros dispositivos electrónicos, lo cual ha permitido tener información más confiable y actualizada con el fin de mejorar la toma de decisiones y la planeación de los sistemas de transporte y desarrollo de infraestructura vial. Se espera que en los próximos años, las tecnolo-

gías de la información y el desarrollo tecnológico sean herramientas fundamentales en el análisis de la movilidad y el tráfico, basado en la captura y análisis de datos y, por supuesto, la toma de decisiones y control, todo en tiempo real.

### 1.2.2. Diseño de la red de rutas

El diseño de la red de rutas hace uso de información geográfica, topología de la red de vías, información de matrices orígenes destino, normativas y planes de desarrollo para finalmente determinar un conjunto de estaciones o paradas que satisfagan las necesidades de movilidad de los usuarios. Adicionalmente, se definen las rutas con su orden de paradas de acuerdo a orígenes, destinos y horarios de desplazamiento. Para realizar un diseño adecuado de las rutas es necesario disponer de información socio-demográfica del lugar y de la distribución geográfica de lugares públicos o de gran afluencia de personas tales como centros de negocio empresarial, hospitales, universidades, colegios, centros recreativos, zonas residenciales, centros comerciales, aeropuertos, terminales de transporte, centros recreativos entre otros. Con esta información es posible estudiar las necesidades de movilidad y las matrices origen destino que caracterizan la ciudad.

Dentro de los tipos de ruta empleados en sistemas BRT se tienen principalmente 2, los servicios locales y servicios de paradas limitadas o expresos. Los servicios locales son aquellos que se detienen en todas las estaciones sin excepción, sus tiempos de viaje tienden a ser los más altos en el sistema. Los servicios de paradas limitadas tienen como objetivo movilizar pasajeros entre puntos distantes realizando el menor número de paradas y lo más rápido posible, usualmente surgen debido a la congestión que se genera cuando los servicios locales se aglutinan en estaciones muy concurridas, así mismo se hace viable su implementación si se tiene un volumen alto de demanda y la infraestructura lo permite [1].

Según Hook [1], una red de rutas efectiva puede ser diseñada siguiendo los siguientes principios: minimizar la necesidad de transbordos a través de la eficiente permutación de rutas; proveer servicios locales, paradas limitadas y expresos en el sistema BRT; hacer más cortas algunas rutas a lo largo del corredor para enfocarse en las secciones de alta demanda. El sistema Transmilenio en Bogotá ha sido uno de los sistemas BRT que ha explotado con mayor éxito el poder de las múltiples permutaciones de rutas. En una sola estación los usuarios pueden elegir entre hasta 10 rutas diferentes incluyendo servicios locales y expresos. Un punto negativo de las múltiples permutaciones es que hacen que se incremente la complejidad del sistema y su operación, así mismo puede resultar confuso para los usuarios ocasionales y nuevos.

Se puede lograr un incremento dramático de la velocidad y la capacidad de un corredor si se le implementan eficientemente diferentes tipos de servicio locales, de paradas limitadas y expresos. Esta ha sido una de las estrategias adoptadas por Transmilenio para lograr sus altos índices de velocidad y capacidad; sin embargo, es de reconocer que encontrar la mezcla correcta de estos ingredientes en un sistema de alta demanda es de alta complejidad.

### 1.2.3. Programación del servicio

La programación de los servicios es un aspecto esencial en la operación de un sistema de transporte público. Es aquí donde se definen los tiempos de salida y de llegada, y en últimas el

tiempo total de viaje que garantice que el pasajero llegue a su destino a tiempo. Tiene la capacidad de garantizar la diferencia entre un servicio cómodo o incómodo para el usuario al repercutir en la congestión de buses y el sobrecupo de pasajeros, es por esto que resulta de gran atención a la hora de mejorar y evaluar calidad de servicio y satisfacción del usuario. Cabe resaltar la siguiente definición de Boyle [28] “La programación es un arte y una ciencia al mismo tiempo, combina lo mejor de la creatividad con pragmatismo, elegancia con precisión matemática”.

La frecuencia del servicio hace referencia al número de vehículos que pasa por un punto de una ruta en una unidad de tiempo, suele expresarse en vehículos por hora. Un término relacionado a éste se conoce por la palabra en inglés “headway”, este hace referencia al tiempo de separación entre dos vehículos que se desplazan en la misma ruta y misma dirección, es el inverso de la frecuencia de servicio y es medido usualmente en minutos [28]. Se debe ser consciente del impacto de la frecuencia del servicio en la velocidad de los vehículos, es de esperar que ésta tienda a disminuir al incrementar el número de buses en la troncal por lo cual es necesario encontrar un equilibrio que satisfaga la demanda de pasajeros y sus necesidades de movilidad.

#### **1.2.4. Programación de los vehículos**

Teniendo una programación del servicio definida en el horario de operación y la frecuencia de paso de los buses, la programación de vehículos tiene como propósito asignar a los buses a cada uno de los servicios dependiendo de su horario y programación teniendo en cuenta el tiempo total de recorrido, el tiempo de espera en el terminal antes de iniciar un nuevo ciclo, el tiempo de traslado a la estación o terminal de inicio del siguiente servicio, entre otras variables. Usualmente esta programación es realizada mediante herramientas de software las cuales pueden evaluar rápidamente diferentes permutaciones y combinaciones de posibles programaciones dado un conjunto de reglas y restricciones con el fin de llegar a una programación eficiente para los operadores. A medida que incrementa el número de buses y de rutas de servicio el proceso incrementa su complejidad [25].

#### **1.2.5. Programación del personal**

Dada una programación de vehículos, el último paso dentro de la planeación de un servicio de transporte es la asignación de conductores a los vehículos, esta se hace en base a un conjunto de restricciones, en primera instancia las de los horario y turnos de trabajo, tiempos de descanso, vacaciones, entre otros. El objetivo es encontrar una programación óptima que satisfaga las restricciones y que cumpla con la programación de vehículos y servicios de los pasos anteriores [25]. Debido a que esta última etapa no será abordada dentro del trabajo de investigación, no se hará mucho énfasis en su descripción.

### **1.3. Calidad del servicio en transporte público**

La calidad del servicio se puede definir, según Kittelson [29], como la medida general o desempeño percibido del servicio de transporte desde el punto de vista del pasajero. La calidad del servicio refleja qué tan bien el servicio de transporte satisface las necesidades de los pasajeros; sin embargo, debe existir un equilibrio entre la calidad de servicio que los pasajeros

idealmente esperan y la calidad de servicio que la agencia de transporte puede ofrecer según sus recursos. El manual “Transit Capacity and Quality of Service Manual” [29] en la definición de un marco general de la calidad de servicio, establece dos grupos principales de factores que se deben analizar. El primero corresponde a la disponibilidad del servicio y el segundo al confort y conveniencia, los cuales se detallan a continuación.

La disponibilidad del servicio es uno de los factores principales en la toma de decisiones de un individuo al determinar si viaja o no en el sistema de transporte. La disponibilidad se observa desde diferentes ángulos. La disponibilidad espacial, por ejemplo, hace referencia a la presencia del servicio cerca al origen o destino del viaje, así como la integración con otros modos de transporte como la bicicleta. La disponibilidad temporal se refiere al horario y frecuencia con la que se ofrece el servicio. Cabe resaltar que, según estudios [29], se ha determinado que la frecuencia es el factor más influyente en la satisfacción de viaje en los pasajeros, es de esperar que al incrementar la frecuencia de vehículos se genera un incremento en los costos operacionales del sistema. La disponibilidad de información permite a los usuarios saber cómo utilizar el servicio de transporte, las rutas, los horarios, modificaciones en el servicio, transferencias etc. La disponibilidad de capacidad se refiere a que los vehículos tengan espacio disponible para que los pasajeros que desean viajar puedan abordar el vehículo, de lo contrario tendrán que esperar el siguiente bus y por lo tanto se incrementarían los tiempos de espera.

El confort y conveniencia es el segundo filtro en el proceso de toma de decisiones de viaje en un individuo, este se subdivide en confiabilidad, carga de pasajeros, tiempo de viaje, seguridad, costos, y apariencia y confort. La confiabilidad del servicio se refiere al tiempo de espera que se debe incurrir para que llegue un vehículo a la estación, así mismo es importante ya que brinda la seguridad de que el pasajero llegue a su destino a tiempo. Esta se ve afectada por factores internos (controlables en cierto modo por la agencia de transporte) como el estado y mantenimiento del vehículo (fallas en las puertas, luces, comunicación etc.), tasa de avería o fallo de los vehículos, la habilidad del conductor para operar el vehículo, la longitud de la ruta, las estrategias de control y supervisión, y finalmente la factibilidad de cumplimiento de la programación de buses. Y factores externos (no controlables por la agencia de transporte) como las condiciones ambientales y climáticas, la variabilidad de la demanda, el comportamiento de los pasajeros al abordar o descender del bus, la congestión de tráfico, las señales de tránsito, entre otros. Sistemas con baja confiabilidad en la frecuencia de sus servicios resulta en problemas de agrupamiento de buses (bunching en inglés) provocando que un mayor número de usuarios experimente condiciones de congestión para abordar.

La carga de pasajeros es un elemento que compromete por un lado la comodidad de los pasajeros y por otro la cantidad de pasajeros transportados con la menor cantidad de vehículos. Cuando se presenta sobrecupo en los buses, estos tienden a demorarse en las paradas para recoger y dejar personas, aumentando el tiempo de permanencia (dwell time en inglés). El tiempo de viaje contabiliza todo el tiempo del viaje de la personas, incluyendo transbordos, tiempo de espera, y desplazamientos dentro del sistema. La seguridad se refiere a la posibilidad tanto de ser afectado por un accidente de tránsito como de ser víctima de robo o agresión. Los costos hacen referencia al pasaje o tarifa para hacer uso del servicio de transporte. Y finalmente, la apariencia y confort se refiere a la limpieza, imagen, y beneficios ofrecidos en las instalaciones e infraestructura como sillas, estaciones, paradas cubiertas, ventanas, aire acondicionado, comodidad de las sillas, aceleración y frenado, ruido, olores, entre otros.

Analizando los factores que inciden en la velocidad del viaje podemos decir que para recorridos con distancias largas se requieren más vehículos, así mismo a medida que un sistema crece en número de pasajeros también se incrementa el número de vehículos necesario para suplir aquella demanda; sin embargo, cada vez que se agregan más vehículos la velocidad promedio disminuye y los costos de operación aumentan. Según estudios citados en [29], se ha podido determinar que el proveer al usuario de información del tránsito a través de pantallas, aplicaciones móviles u otros dispositivos ayuda a que la espera del usuario sea más positiva y ayude a usar más eficientemente el tiempo al planear de una mejor manera la llegada a las estaciones o paradas de bus. Por lo cual, es una buena opción el mantener medios de comunicación eficientes con los usuarios.

## 2. Inteligencia artificial aplicada a transporte público

Las ciencias de la computación y otras ramas del conocimiento han venido desarrollando técnicas para abordar problemas del mundo real con diferentes características, donde por lo general se presenta incertidumbre y cambio constante. Dentro de las técnicas más representativas se encuentran lógica difusa, redes neuronales, computación evolutiva, métodos probabilísticos y uso de agentes aplicando colaboración, coordinación, cooperación y comunicación. Hoy en día se pueden apreciar diferentes contribuciones en el área de transporte en general, por ejemplo, el cobro electrónico de peajes, vigilancia y monitoreo automático de vías, conteo de vehículos, detección y registro de infracciones, notificación de emergencias, control de señales de tránsito, priorización de circulación e inclusive sistemas de alerta para conductores respecto a peligros en la vía o información de viaje. A continuación, se realiza una revisión de trabajos que abordan problemáticas de transporte público basados en buses mediante el uso de técnicas de inteligencia artificial.

### 2.1. Sistemas inteligentes de transporte

En la literatura se encuentran propuestas para optimizar sistemas de transporte; sin embargo, son pocos los que se enfocan en sistemas BRT [6]. Por ejemplo, Zhu [7] propone un esquema de priorización de circulación en intersecciones que permita mantener los tiempos de separación entre buses y que garanticen una frecuencia del servicio más controlada. El esquema planteado se validó empleando el simulador Vissim encontrando algunos efectos contraproducentes en los demás vehículos que hacen uso de la intersección, adicionalmente, este tipo de aproximaciones no contempla la demanda de pasajeros la cual es de vital importancia. Dong et al. [8] plantea un control en tiempo real mediante reglas IF-THEN en base al análisis de información recopilada por cámaras de video en las estaciones para determinar la densidad de pasajeros; sin embargo, carece de flexibilidad y adaptabilidad al usar reglas fijas y no se tiene en cuenta información de matrices origen destino. Zhang et al, [30] propone un modelo de predicción del volumen de pasajeros mediante el uso de SVM empleando información de los años 1990 al 2005; en resumen, se obtuvieron resultados ligeramente mejores que los obtenidos mediante una red neuronal con retro propagación. Otros trabajos en el área de la informática aplicados a sistemas diferentes al BRT implementan técnicas de inteligencia artificial para mejorar los tiempos de viaje [21], las rutas de los buses [22] y la frecuencia de los servicios [23]; sin embargo, estos trabajos tienen la debilidad de operar bajo el esquema de rutas estáticas y no contemplan el comportamiento estocástico de la demanda.

Los algoritmos evolutivos son usualmente aplicados con muy buenos resultados en problemas complejos de optimización inclusive analizando múltiples variables simultáneamente. En el trabajo realizado por Zuo et al, [22] se propone un sistema de programación de rutas de buses basado en parámetros como el tiempo de separación, número de buses disponibles, número de estaciones, número de conductores, tiempo de inicio entre otros. El algoritmo es ejecutado por 300 generaciones para que converja. El resultado obtenido se comparó con una programación realizada por expertos, la primera en varias ocasiones generó soluciones con un número menor de vehículos que el segundo, lo cual es beneficioso al reducir los costos de operación. Por lo general, los trabajos encontrados relacionados a algoritmos genéticos se concentran en la optimización de la programación de rutas de buses [31] [32] y a determinar las rutas y recorridos más cortos y eficientes según las necesidades [33].

## 2.2. Predicción y reconocimiento de patrones de movilidad urbana

Rojas-Galeano expone en su trabajo [11] la debilidad del mecanismo actual de rutas estáticas al carecer de adaptabilidad a las condiciones cambiantes de la demanda de los usuarios. Para lograrlo, se plantea de vital importancia el uso de herramientas automatizadas que permitan un análisis de la demanda de manera constante y confiable [12] debido a que los métodos clásicos de recopilación de información a través de encuestas y entrevistas suelen ser costosos [13], deben realizarse periódicamente, pueden verse influenciados por la subjetividad de los encuestados [14] [15] o no logran ofrecer información de patrones y practicas espacio-temporales [16]. Es por esto que en los últimos años se ha venido desarrollando trabajos en análisis de la demanda mediante CDR [17], dispositivos móviles [18][19] y estrategias de IoT [20].

Di Lorenzo, et al. [18] presenta una herramienta denominada AllAboard la cual analiza información extraída de la red de telecomunicaciones (CDR) para ayudar a las instituciones de tránsito en explorar visualmente el comportamiento de movilidad en la ciudad para tomar mejores decisiones en planeación e implementación de infraestructura y sistemas de transporte. Los datos empleados en el trabajo corresponden a la ciudad de Abiyán en Costa de marfil recopilados durante un periodo de 5 meses. Se compone de alrededor de 2.5 billones de registros de llamadas y mensajes de texto anonimizados de 5 millones de usuarios de las cuales puede inferirse la posición mediante triangulación de las antenas de la red. El componente principal del sistema realiza una tarea de minería y análisis de datos el cual extrae información de matrices origen-destino y patrones de rutas. Toda la información extraída puede ser visualizada por una interfaz de usuario convirtiéndose en una herramienta de gran contribución para el análisis de la demanda de movilidad. Diferentes trabajos realizados por Calabrese [34][35] evidencian el potencial de los datos CDR y GPS para el análisis del comportamiento de transporte y movilidad en una ciudad permitiendo generar visualizaciones de datos y predicciones de patrones futuros los cuales están teniendo un gran impacto en la planeación y operación de sistemas de transporte.

Foell et al. [36] describe una serie de algoritmos para realizar predicción de patrones de movilidad en un sistema de transporte público mediante el uso de una tarjeta de viaje. Por ejemplo, un primer algoritmo predice las paradas de un solo individuo basado en su historial de viaje, otro mecanismo realiza un análisis más global determinando patrones de decisión en conjuntos de individuos. Para la evaluación se tomó información de la ciudad de Lisboa en

Portugal. El algoritmo RandomWalk fue el que obtuvo mejor precisión en la predicción seguido del Collaborative evidenciando que el análisis grupal genera mejores resultados.

### 2.3. Sistemas MultiAgente

Los sistemas multiagente se caracterizan por componerse de un conjunto de agentes inteligentes que interactúan entre ellos para llevar a cabo tareas complejas. Usualmente siguen la filosofía de “divide y vencerás” donde las actividades y responsabilidades se distribuyen en varias unidades lo que permite tener agentes más simples y sencillos, en lugar de una sola unidad demasiado robusta y compleja. A diferencia de los sistemas centralizados, un sistema multiagente tiene mayor tolerancia a fallos, pues si uno de sus componentes falla los demás pueden seguir operando con normalidad. Los sistemas multiagente hacen uso de diferentes técnicas para garantizar su correcta operación y éxito en el desarrollo de sus tareas entre estas se encuentran la cooperación, coordinación, comunicación y colaboración.

Respecto al uso de estos sistemas en movilidad urbana, Wang et al. [9] sugiere un diseño multiagente de control para programación de rutas BRT y despacho de buses de manera distribuida basado en información estadística, no obstante, se enfoca en las tareas, roles y organización pero no profundiza en un modelo de conocimiento que soporte las acciones de los agentes. En la universidad Javeriana, L. Serrano propuso un modelo de cooperación basado en agentes para controlar el tráfico de buses y vehículos particulares en intersecciones semaforizadas [10], obteniendo en la simulación un incremento en la velocidad promedio de operación del 6%; sin embargo, el autor sugiere que los resultados deban ser comparados con otros sistemas, adicionalmente, el tramo empleado en la simulación es muy corto lo cual puede omitir aspectos relevantes del problema.

Otra área de gran surgimiento y que está muy relacionada con la interacción de elementos independientes distribuidos es el internet de las cosas (IoT). Aún en la actualidad el concepto resulta un poco difuso dado el amplio espectro de oportunidades y tecnologías que cubre, su idea general radica en que los objetos a nuestro alrededor son fuentes de información con un alto potencial de contribución a diferentes aspectos de nuestra vida diaria, que con el avance tecnológico actual, en su gran mayoría se componen de características como sensores, efectores y mecanismos de comunicación lo cual es suficiente como para que a través de su interacción y cooperación se generen soluciones a diferentes necesidades y problemáticas del mundo moderno actual. El paradigma de IoT busca que por medio del internet se genere toda una red de intercomunicación entre objetos ubicados en diferentes partes del mundo transfiriendo y analizando información y además actuando y cambiando el mundo en tiempo real [37][38]. A pesar que le termino se propuso desde el año 1999, hace ya alrededor de 15 años, aún existen bastantes áreas por trabajar, como la definición de estándares, plataformas, arquitecturas, inteligencia computacional y demás que puedan lograr el objetivo de interconectar el gran número de objetos y cosas que se propone.

Dentro de las diversas aplicaciones donde IoT tiene capacidad de contribución se encuentran principalmente los servicios a la comunidad como por ejemplo la salud mediante el monitoreo automatizado y remoto de pacientes, la optimización y control del transporte público, recomendación de lugares y actividades a usuarios, monitoreo y control de transporte y logís-



tica, ambientes inteligentes y adaptables, rastreo, asistencia remota, productividad laboral, monitoreo y control de procesos de producción y fábricas, sistemas de seguridad, educación, investigación y transferencia de conocimiento, esparcimiento y entretenimiento, ciudades inteligentes entre muchas otras más.

### 3. Conclusiones y discusión

A partir de la revisión del estado del arte y de la breve recopilación de conocimiento e información que se presentó anteriormente, podemos extraer algunos conceptos e ideas principales que se consideran vitales en el desarrollo de este trabajo.

Del proceso de planeación de un sistema de transporte, se puede decir que en general es una tarea compleja que debe ser abordada de forma rigurosa. Un elemento imprescindible del cual se deriva el éxito del proyecto reside en el análisis exhaustivo de la demanda de pasajeros, por lo cual el diseño del sistema debe estar orientado a satisfacer sus necesidades. Una forma de determinar el buen desempeño del sistema y la satisfacción de los usuarios es a través de la medición de la calidad del servicio, sabemos que los principales factores a considerar son la disponibilidad, confiabilidad, carga de pasajeros, tiempo de viaje, seguridad, costos, apariencia y confort de los cuales algunos dependen de elementos internos al sistema y otros externos que no son fácilmente controlables.

Para este proyecto consideramos de vital importancia diseñar una solución que, en la medida de lo posible, esté fuertemente orientada a la satisfacción del pasajero teniendo en cuenta las capacidades y recursos disponibles que tiene la agencia de transporte. En la medición de la calidad de servicio se plantea tener en cuenta principalmente aquellos elementos que dependen de la operación del sistema, teniendo como objetivo la mejora del funcionamiento a partir de la infraestructura y recursos inmediatamente disponibles. El sistema buscará una manera eficiente de operar mas no pretende encontrar acciones o cambios de diseño de la infraestructura vial, o de la iluminación, de las señales de tránsito, ni de la limpieza, mantenimiento o seguridad del sistema. Teniendo claro esto, se toman como elementos principales en la medición de la calidad de servicio: la disponibilidad, la confiabilidad, carga de pasajeros y tiempo de viaje. No obstante, como trabajo futuro el proyecto se podría extender a abarcar los demás componentes del marco de medición de calidad de servicio.

Los sistemas multiagente tienen un gran potencial de contribución al estudio y solución de problemas de sistemas de transporte, debido a que la naturaleza del problema radica en la gran cantidad de elementos de diferentes características que interactúan entre si generando un sinfín de dinámicas y situaciones complejas. El paradigma de agentes provee un marco general que permite descomponer el problema en unidades individuales más pequeñas facilitando el modelamiento del problema y el diseño de la solución, además de otras ventajas de los sistemas distribuidos como lo son la tolerancia a fallos, escalabilidad, confiabilidad, flexibilidad, orientación a la comunicación y el uso eficiente de recursos, entre otros.

La inteligencia artificial también ha demostrado grandes capacidades en la resolución de problemas del ser humano, sobre todo en casos que son difíciles de modelar matemáticamente

o donde encontrar una solución óptima global en un tiempo razonable resulta computacionalmente complejo. Todas las técnicas que se han desarrollado tienen ventajas y desventajas para resolver ciertos problemas por lo cual es necesario tener una buena comprensión antes de abordar el diseño de la solución. En sistemas de transporte aún es amplio el campo por explorar, y a medida que las ciudades crecen, se hace más urgente la adopción de nuevas estrategias que permitan ofrecer a los ciudadanos servicios eficientes que permitan satisfacer sus necesidades, gustos y expectativas. Para llegar a este paradigma se identifica la necesidad de compartir información entre los dos elementos principales que integran el sistema de transporte, los pasajeros y la agencia de transporte, de tal manera que se pueda llegar a un escenario gana-gana donde los pasajeros al ofrecer información permiten que la agencia gestione mejor sus recursos y ofrezca un mejor servicio que finalmente beneficia a los pasajeros al movilizarse más rápida y cómodamente, en un servicio de buena calidad.

### III. VISIÓN GENERAL DEL SISTEMA PROPUESTO

Dentro de la revisión del estado del arte se observaron diferentes aproximaciones de solución para problemas de transporte público basados en buses, unas se enfocaban en un problema en particular, mientras que otras trataban de brindar una solución desde un punto de vista un poco más general. Dentro de este último grupo de propuestas de solución se puede destacar que en diversos textos se abordaba el problema desde un punto de vista de optimización multi-objetivo [39][40][6][41] donde, por un lado se busca maximizar la satisfacción del pasajero y por otro lado minimizar los costos de operación con el propósito final de encontrar una planeación de operación global óptima. Este tipo de aproximaciones generan una planeación y control de operación basados en la adherencia de los buses a una programación lo cual tiene un enfoque determinístico, a pesar de que la demanda de transporte usualmente se comporta de manera estocástica [42]. Adicionalmente, elaborar un modelo que contemple las diferentes dinámicas de la demanda y del sistema de transporte es bastante complejo, sumando a ello la dificultad de obtener una solución óptima en un tiempo razonable. Soluciones de este tipo pueden brindar buenos resultados en sistemas de baja demanda o con baja frecuencia de buses; sin embargo, para casos de alta demanda o alta frecuencia de buses tiende a presentarse agrupamiento de buses, tiempos largos de espera, sobrecupo en buses, entre otros, generando insatisfacción en los pasajeros [42][43].

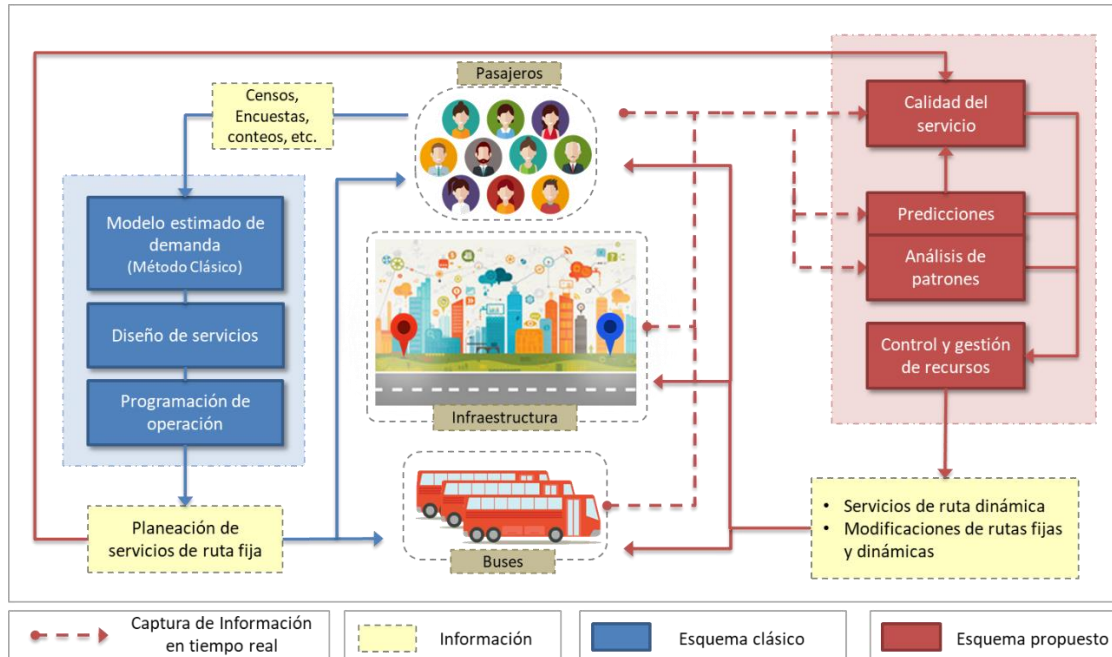
Desde nuestro punto de vista y coincidiendo con otros autores [42][20][11][8][44], consideramos que un buen sistema debe estar soportado en la toma de decisiones y captura de información en tiempo real con el fin de permitir adaptarse a las condiciones dinámicas de la demanda. Nuestra propuesta del sistema obedece a un enfoque oportunista, buscando la solución en tiempo real, dividiendo el problema en elementos más pequeños atacados a través de técnicas distribuidas y mecanismos de interacción y negociación, sin tener una visión centralizada global óptima sino soluciones locales sub-óptimas que en conjunto proveen una buena solución. El sistema, adicionalmente, debe poder realizar predicciones del estado general de la demanda con el fin de poder anticiparse a deficiencias en el servicio y realizar las correcciones pertinentes administrando eficientemente sus recursos.

#### 1. Visión general

Para el diseño del sistema nos hemos enfocado en cuatro problemáticas que están fuertemente relacionadas: (i) la reducción del tiempo de viaje de los usuarios haciendo énfasis principalmente el tiempo de espera, (ii) la disminución de la congestión y sobrecupo en estaciones y buses en el sistema, (iii) la planeación eficiente de rutas de acuerdo a la demanda de los pasajeros, y (iv) la optimización y uso eficiente de los recursos que comprenden el sistema.

La Figura 1 muestra el modelo general del sistema propuesto, en el centro se ubican los tres elementos principales del sistema de transporte, en primer lugar tenemos los pasajeros, seguido de la infraestructura vial que comprende vías, señales de tránsito o de control de tráfico y estaciones, en tercer lugar se ubican los buses. A la izquierda, en azul, se aprecian de manera resumida los elementos que integran el proceso clásico de diseño de la operación de un sistema de transporte, el cual inicia recopilando información a través de censos y encuestas para generar

un modelo de demanda, posteriormente de hace el diseño de los servicios y finalmente la programación de operación de buses obteniendo como salida la planeación de servicios de ruta fija.



**Figura 1.** Modelo general del sistema propuesto.

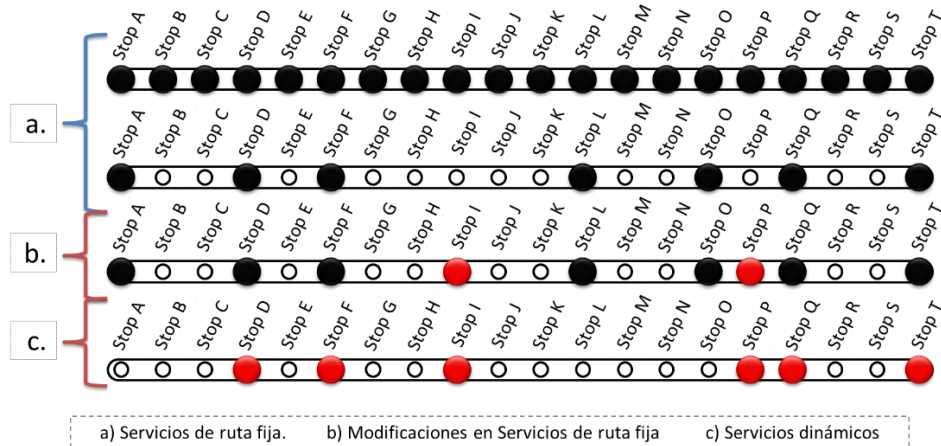
A la derecha, en rojo, se encuentran los elementos adicionales del esquema propuesto en este trabajo de investigación. Inicia con un componente de evaluación de la calidad del servicio el cual toma como entradas la planeación de servicios de ruta fija e información capturada en tiempo real de pasajeros, estaciones y buses. Este elemento tiene como responsabilidad determinar si la operación actual cumple con la demanda de transporte y qué tan bien satisface las necesidades de movilidad de los pasajeros. Para ello, se apoya también en predicciones basadas en análisis de patrones de viaje de los pasajeros con el fin de anticipar posibles deficiencias en la operación. Posteriormente, se tiene un elemento de control y gestión de recursos el cual tiene como objetivo generar servicios de ruta dinámica y modificaciones en los servicios de ruta fija. Finalmente, las modificaciones y decisiones que tome el sistema deben ser comunicadas a las estaciones y buses pero principalmente a los pasajeros con el fin de que estos puedan aprovechar dichos cambios y mejoras.

En primera instancia, se debe aclarar el por qué se toma como base de operación la planeación de servicios de ruta fija obtenida por el esquema clásico, cuando se han expuesto las diferentes problemáticas que posee, en lugar de una aproximación 100% de servicios dinámicos. Las razones son diversas, en primer lugar, el método clásico no se puede desmeritar del todo, es una aproximación que brinda una solución local que satisface una buena porción de la demanda y de la cual el sistema puede basarse en lugar de comenzar desde cero a realizar una

planeación 100% dinámica. Otra razón es que un sistema BRT es un sistema masivo de transporte y al movilizar una gran cantidad de pasajeros resulta bastante complejo diseñar un servicio personalizado para cada uno de ellos, por lo cual los servicios de ruta fija ayudarían a permitir un mínimo de calidad de servicio en el sistema. Otro punto importante a considerar es que el cambio constante en las características de los servicios o rutas de los buses afecta negativamente el entendimiento y la usabilidad del sistema y por ende el confort de los pasajeros. Por estas razones se determina que un sistema completamente dinámico no es viable con las tecnologías y características de los pasajeros que se tienen hoy en día; sin embargo, no se descarta que a futuro se pueda romper esta barrera a través del uso de tecnología y cambios cívicos.

## 2. Operación del sistema

La Figura 2 representa visualmente los 4 tipos de servicios que operarían en el sistema. En primer lugar se tienen los servicios de ruta fija que se dividen en servicios locales y servicios de paradas limitadas o expresos. Los servicios locales son aquellos que se detienen en todas las estaciones sin excepción, sus tiempos de viaje tienden a ser los más altos en el sistema. Los servicios de paradas limitadas tienen como objetivo movilizar pasajeros entre puntos distantes realizando el menor número de paradas y lo más rápido posible, usualmente surgen debido a la congestión que se genera cuando los servicios locales se aglutinan en estaciones muy concurridas, así mismo se hace viable su implementación si se tiene un volumen alto de demanda y la infraestructura lo permite. La estrategia del sistema radica en agregar paradas adicionales a los servicios de ruta fija o generar rutas dinámicas según las necesidades en pro de la mejora de la calidad de servicio.



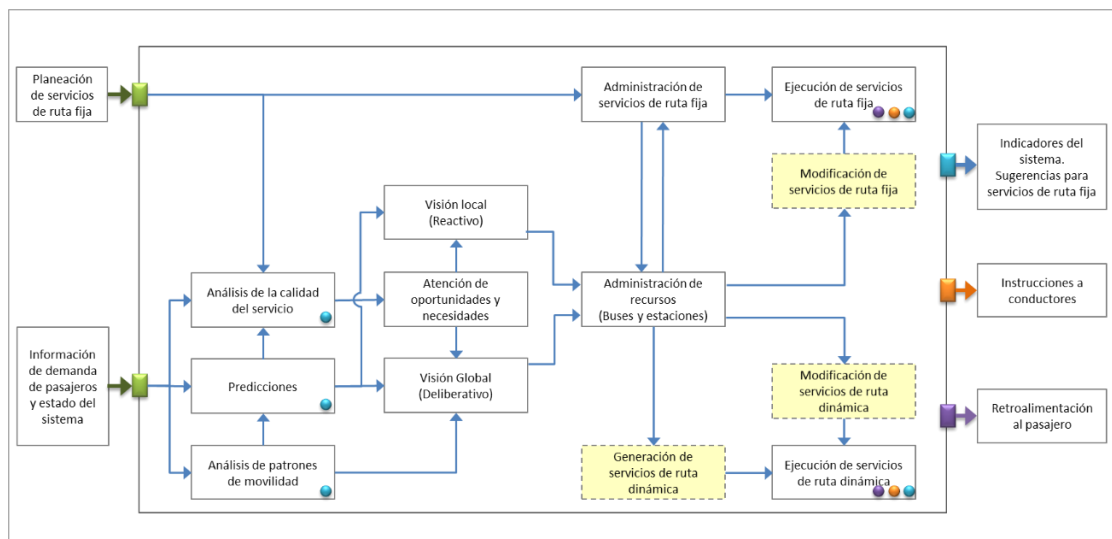
**Figura 2.** Ejemplos visuales de tipos de servicios en el esquema propuesto. En rojo se representan paradas generadas dinámicamente.

En el diseño del sistema se plantean dos conceptos fundamentales, las necesidades y oportunidades. Las necesidades son exigencias del sistema que se requieren satisfacer, estas necesidades surgen en primer lugar por el deterioro de la calidad del servicio debido, por ejemplo, al sobrecupo en buses y estaciones o al aumento del tiempo de espera o tiempos de viaje de los

pasajeros; y en segundo lugar por el deterioro de la sostenibilidad operativa del sistema, es decir, el aumento en los costos de operación debido en principal medida al uso de muchos vehículos o el uso desmedido del combustible.

Las oportunidades son situaciones favorables que no son planeadas pero son propicias para atender una necesidad particular del sistema. Estas pueden ser cuantificables en un costo-beneficio para el sistema, es decir, para una situación particular qué impacto negativo tiene realizar determinada acción y qué beneficio se obtiene. Un ejemplo puede ser, en un determinado tiempo del día los buses que tienen previsto atender una estación están retrasados lo cual está generando incrementos en los tiempos de espera de los pasajeros y congestión de circulación dentro de la estación; sin embargo, un bus está próximo a la estación pero dentro de su itinerario de paradas no tiene contemplado detenerse en dicha estación, adicionalmente, la ocupación del bus es baja, es acá donde el bus tiene una oportunidad de atender una necesidad a partir de incorporar una parada adicional en dicha estación con el fin de atender una proporción significativa de personas.

La Figura 3 presenta un diagrama del esquema de solución donde se puede apreciar con más detalle los diferentes componentes y la forma en que se relacionan. Es importante resaltar que este diagrama no pretende representar los agentes del sistema ni sus interacciones, sino más bien dar una perspectiva funcional que posteriormente será el insumo para realizar el diseño del sistema multiagente. Se aclara que es posible que un mismo agente desempeñe una o varias tareas de diferentes componentes del diagrama. Se puede apreciar que el diagrama sigue la aproximación del modelo general presentado anteriormente, donde se toman como entradas la planeación de servicios de ruta fija junto con información de demanda y estado del sistema capturada en tiempo real.



**Figura 3.** Modelo detallado del sistema propuesto.

Como salidas del sistema se tiene información destinada a los administradores o agencia de transporte para procesos de toma de decisiones que contiene indicadores de operación del

sistema y reportes que permiten realizar cambios en la planeación de servicios de ruta fija según análisis de demanda. Por otro lado se tiene las instrucciones a conductores y finalmente la retroalimentación al pasajero a través de medios de difusión de información.

Dentro del sistema observamos dos componentes dedicados a llevar a cabo la operación de los servicios de ruta fija obtenidas por el esquema clásico y estos interactúan con un componente de administración de recursos que permita realizar las modificaciones pertinentes en las rutas. A la izquierda vemos los elementos orientados a la evaluación de la calidad de sea predicción y el análisis de patrones la predicción y el análisis de patrones, los cuales son el insumo para la detección de necesidades y oportunidades. El elemento de visión local reactiva y visión global deliberativa se refiere a aquellos mecanismos de toma de decisiones que soportan las acciones del sistema, la parte reactiva hace uso de información del entorno en un instante determinado mientras que la visión deliberativa hace referencia al uso de predicciones del estado del sistema, para diferentes situaciones es posible que uno tome mayor relevancia que el otro. Posteriormente, se observa el elemento de administración de recursos el cual posee criterios enfocados al control de costos operativos del sistema con el fin de mantener una sostenibilidad.

### **3. Consideraciones**

La característica dinámica en tiempo real puede generar dudas en el lector en cuanto al impacto en la usabilidad del sistema respecto a cómo sabe el pasajero qué rutas y qué buses abordar, para ello, se han considerado herramientas como pantallas de información (que actualmente se han implementado en algunas estaciones) y el uso de dispositivos móviles con el fin de retroalimentar a los usuarios. A pesar de que el presente trabajo no abordará con detalle estos elementos, sino más bien se centra en la viabilidad operativa general del sistema propuesto, se considera que como trabajo futuro se podrían plantear y diseñar estos mecanismos de comunicación y difusión de información. Este trabajo de investigación está enfocado en determinar, mediante simulación, qué tanto beneficio se obtiene de la operación del sistema propuesto. Esto eventualmente permitirá entrar a evaluar si las mejoras obtenidas justifican el desarrollo de los estudios y diseños faltantes y por supuesto los costos de implementar el sistema en la vida real.

Por otro lado, es importante mencionar el tema de privacidad de la información debido a que el sistema captura datos de personas y por ende está la posibilidad de que estos pueden ser usados de una manera mal intencionada, por ejemplo, al realizar seguimiento o vigilancia de un individuo con propósitos delictivos entre otras posibilidades. Para este tipo de problemáticas se puede hacer uso de técnicas de anonimización de datos, si bien en este trabajo no se abordará este tema, se hace explícita su importancia y potencial de trabajo futuro.

## IV. MODELO DE AGENTES

Para el diseño del sistema multiagente se aplica la metodología AOPOA [24], una metodología orientada a agentes basada en una aproximación organizacional. En primer lugar se realiza la caracterización del sistema donde se definen los objetivos o metas del sistema en forma de jerarquía junto con las habilidades, recursos, precondiciones y tareas que permitan cumplir los objetivos propuestos. Finalmente, se obtiene la tabla de roles y tareas con la cual se hace el diseño de los agentes y la definición de vínculos y estrategias de cooperación. Para obtener más detalle de todos los elementos involucrados en el diseño del sistema multiagente por favor referirse al anexo 1: Sistema multiagente.

### 1. Metas del sistema

Para realizar la definición de metas del sistema se toma como referencia la visión general y detallada de la propuesta de solución presentados anteriormente. Como requerimientos generales del sistema podemos plantear dos grupos, uno enfocado a la satisfacción de la demanda de transporte y por ende de las necesidades de movilidad de los pasajeros y otro orientado a los costos de operación del sistema con el fin de obtener un balance entre ambos. A continuación, presentamos los dos grupos de requerimientos generales del sistema:

- Satisfacer la demanda de transporte.
  1. Minimizar el tiempo de espera.
  2. Minimizar el tiempo de viaje en el vehículo.
  3. Minimizar la congestión y sobrecupo de pasajeros en estaciones y buses.
  4. Maximizar los viajes directos y minimizar los transbordos dentro del sistema.
  5. Proveer información actualizada y en tiempo real.
  
- Reducir los costos de operación y administrar eficientemente los recursos.
  1. Maximizar el número de pasajeros transportados por bus (reducir del número de sillas libres y aprovechar el espacio disponible en el bus).
  2. Minimizar el número de vehículos en operación.
  3. Proveer indicadores de desempeño del sistema que permita el análisis y toma de decisiones.

A partir de las definiciones anteriores se procede a determinar las metas del sistema, como se presentan en la Tabla 1. Las metas se pueden interpretar como una jerarquía de objetivos en donde se tiene una meta global la cual se descompone en sub-metas y estas a la vez vuelven a descomponerse de manera iterativa. A medida que aumenta el nivel dentro de la jerarquía se tienen metas cada vez más específicas.



**Tabla 1.** Jerarquía de metas del sistema.

<b>Meta Global:</b> Brindar un servicio de transporte de calidad.	
1.	Gestionar la información del sistema.
1.1.	Recolectar, depurar y almacenar información de las necesidades de movilidad de los pasajeros en tiempo real.
1.2.	Retroalimentar a los pasajeros con información del sistema.
1.3.	Recolectar y comunicar información requerida por otros agentes del sistema.
2.	Análisis de información y reconocimiento de patrones de movilidad.
2.1.	Determinar matrices origen destino y patrones de movilidad de los pasajeros.
2.2.	Realizar predicciones de demanda en el sistema.
2.3.	Realizar predicciones de ocupación de los vehículos.
3.	Verificación y cumplimiento de la calidad del servicio.
3.1.	Detectar deterioro de la calidad del servicio.
3.2.	Solicitar refuerzo y ayuda de otros elementos del sistema.
3.3.	Detectar oportunidades de mejora de la calidad del servicio.
3.4.	Ofrecer refuerzo y apoyo a otros elementos del sistema.
3.5.	Calcular y almacenar indicadores de calidad del servicio.
4.	Administrar eficientemente los recursos del sistema.
4.1.	Administrar el ingreso y salida de buses del sistema de acuerdo a la demanda.
4.2.	Detectar oportunidades de ahorro de recursos y reducción de costos.
4.3.	Administrar eficientemente el acceso de los buses a las estaciones.
5.	Transportar los pasajeros.
5.1.	Recoger y dejar pasajeros en las estaciones del sistema de acuerdo a sus necesidades.
5.2.	Obedecer las normas de transporte.
6.	Administración del sistema
6.1.	Presentar reportes e indicadores de desempeño.
6.2.	Recepción y notificación de cambios en la parametrización del sistema.

## 2. Agentes

Una vez definidas las metas del sistema se establecen las habilidades, recursos y tareas que permitan cumplir los objetivos propuestos para después determinar los roles y realizar el diseño de los agentes. Para nuestro sistema se obtuvieron 3 tipos de agentes. Los agentes estación y bus son multi-instancia y son los dos tipos de agentes más importantes y responsables de cumplir las metas vitales del sistema. Por otro lado, el agente administrador cumple un papel secundario, si bien tiene menos responsabilidades no quiere decir que sea innecesario, pues sirve como medio de comunicación con los miembros de la entidad de transporte para gestionar la

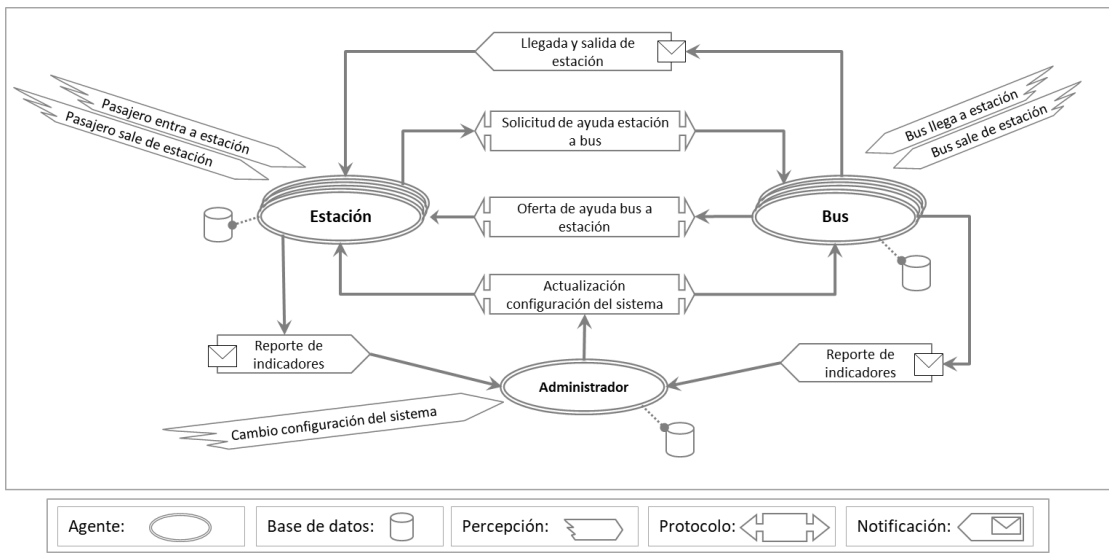
parametrización del sistema y brindar reportes que contribuyan a la toma de decisiones de la organización. La Tabla 2 presenta una definición general de los agentes.

**Tabla 2.** Definición de los agentes.

<b>Nombre</b>	Agente Estación
<b>Descripción</b>	
Es un agente cuyo propósito es recolectar información de la intención de viaje de los pasajeros. Dentro de sus capacidades se encuentra la de determinar hábitos de viaje mediante el análisis de patrones de movilidad y comunicarlos a otros elementos del sistema que los requieran. También sirve como medio de comunicación entre el sistema y el pasajero para notificar cambios en los servicios para su beneficio. Administra el uso de las paradas de buses para evitar congestiones y está en constante revisión de deterioros en el nivel de calidad de servicio (congestiones, demoras, sobreocupación) para tomar acciones correctivas que permitan mejorarlo mediante solicitudes de colaboración a otros agentes.	
<b>Metas principales</b>	1.1 - 2.1 - 2.2 - 3.1 - 3.2 - 4.3
<b>Nombre</b>	Agente Bus
<b>Descripción</b>	
Es un agente embebido en la unidad a bordo del bus. Su propósito es servir las estaciones para transportar los pasajeros desde su lugar de origen a su destino procurando mantener tiempos cortos de espera, tiempos cortos de viaje, e índice de ocupación adecuado que maximice los niveles de satisfacción de los pasajeros. El agente recibe solicitudes de ayuda de las estaciones y como respuesta envía una oferta de acuerdo a su capacidad y situación. Por otro lado, el bus al detectar por iniciativa propia una oportunidad de ayuda ofrece su servicio a estaciones que se encuentre dentro de su recorrido y elige aquella que se más conveniente para mejorar la calidad de servicio del sistema.	
<b>Metas principales</b>	2.3 - 3.1 - 3.2 - 3.3 - 3.4 - 5.1
<b>Nombre</b>	Agente Administrador
<b>Descripción</b>	
Es un agente cuyo propósito es brindar servicios de administración a los miembros de la entidad de transporte. Dentro de los servicios se encuentra la presentación de reportes e indicadores de desempeño del sistema y servicios de parametrización en referencia a: niveles de calidad de servicio, programación de servicios de ruta fija, normas de tránsito y definición de la red de infraestructura vial. Cuando se realicen cambios de parametrización es deber del agente notificar a los agentes involucrados para que realicen la correspondiente actualización. También permite el envío remoto de mensajes a otros agentes para solicitar servicios o la ejecución de acciones determinadas.	
<b>Metas principales</b>	1.3 - 6.1 - 6.2

### 3. Interacciones y Cooperación

La cooperación entre los agentes del sistema es fundamental para garantizar el cumplimiento de las metas, es aquí donde se abordan los elementos orientados a la colaboración, la coordinación, y la resolución de conflictos aprovechando las habilidades de comunicación de los agentes. La Figura 4 presenta el diagrama de interacciones. Se pueden observar las percepciones a las que reacciona cada agente, los protocolos que emplean para aprovechar una oportunidad o suplir una necesidad en el sistema (como se mencionó previamente en el capítulo de visión general) y otros mensajes orientados a notificar y compartir información relevante como el reporte de indicadores y la notificación de llegada y salida de un bus a la estación. La dirección de las flechas simboliza la dirección en que se inicia el protocolo o el sentido del mensaje en el caso de una notificación.



**Figura 4.** Diagrama de interacciones entre los agentes del sistema.

En la Tabla 3 se puede observar una descripción más detallada de las interacciones junto con el protocolo que emplean. Para la primera se hace uso de un protocolo simple tipo request-response en donde se solicita a otro agente realizar una acción y este envía un mensaje de respuesta. Para los últimos dos, se hace uso de una adaptación de un “Contract-Net” y de una subasta tipo “English”.

**Tabla 3.** Tabla de interacciones y protocolos.

Interacción	Descripción	Protocolo
Actualización configuración del sistema	Esta interacción ocurre cuando el personal de la agencia de transporte realiza cambios en la parametrización del sistema y estos deben ser notificados a los demás agentes.	Request-Response
Solicitud de ayuda estación a bus	La interacción ocurre cuando una estación posee una necesidad e inicia un proceso de	StationHelpContract-Net

	búsqueda del bus más apropiado para ayudarla.	Adaptación Contract-net
Oferta de ayuda bus a estación	La interacción ocurre cuando un bus detecta una oportunidad e inicia un proceso de búsqueda de la estación que obtenga mayor beneficio de la situación.	BusHelpAuction Adaptación subasta tipo English

La Figura 5 y Figura 6 presentan de manera detallada los protocolos empleados por los agentes. El protocolo Request-Response es bastante simple y es utilizado en interacciones donde solo se pretende notificar información o transmitir un conjunto de datos de manera rápida.

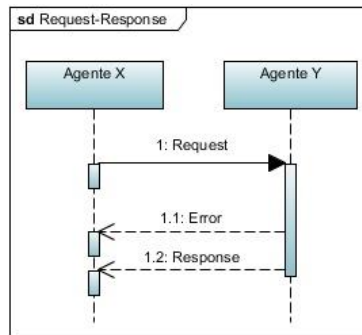


Figura 5. Protocolo Request-Response.

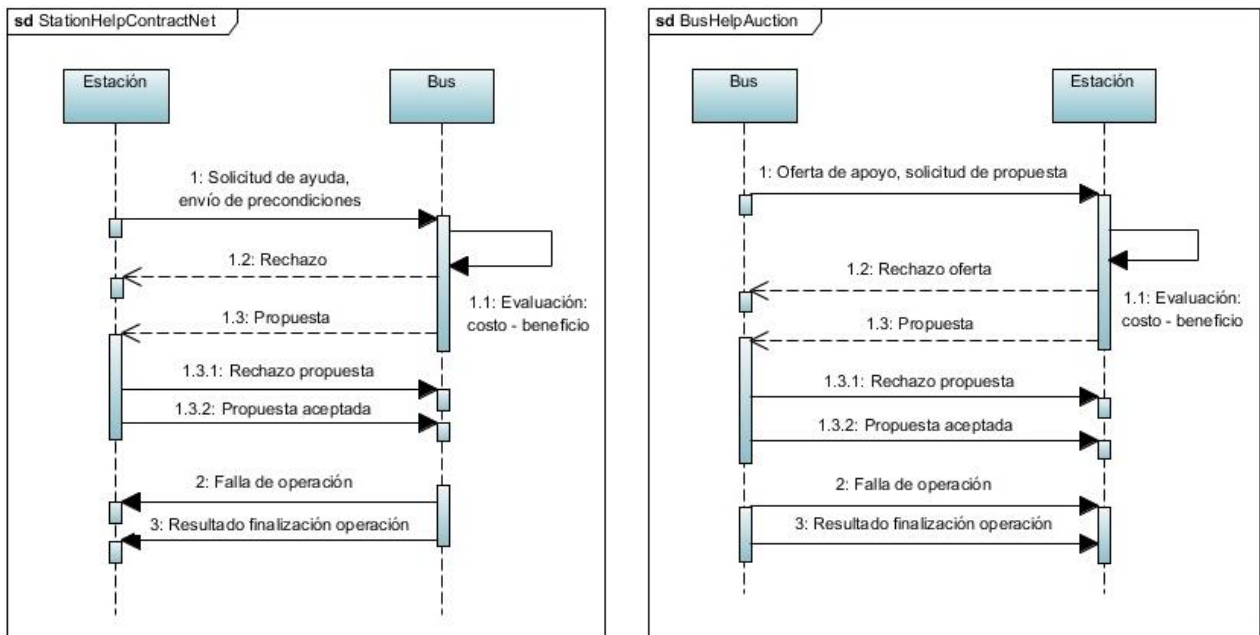


Figura 6. Protocolos StationHelpContractNet y BusHelpAuction.

El protocolo “StationHelpContractNet” es iniciado por la estación y tiene como finalidad encontrar el bus que genere el menor costo al sistema y el mayor beneficio posible a los usuarios al atender una necesidad en una estación. Básicamente, se envía a diferentes agentes de tipo bus una solicitud de ayuda, estos determinan el costo-beneficio y lo comunican en respuesta a la estación, quién finalmente determina cuál es la mejor opción. Por otro lado, el protocolo “BusHelpAuction” es iniciado por el bus, éste al detectar una oportunidad de contribución a la mejora de la calidad del servicio busca una estación dentro de un intervalo de su recorrido la cual posea dificultades en atender la demanda de pasajeros. El agente recopila las propuestas, compara los requerimientos de cada estación y filtra aquellas que se encuentren dentro de sus capacidades ayuda, finalmente, selecciona la estación a la cual es más conveniente ayudar.

**Tabla 4.** Tabla de mensajes y acciones.

Mensaje	Emisor	Receptor	Acciones
Station2Bus HelpRequest	Estación	Bus	El bus recibe la solicitud de ayuda de la estación y en primera instancia evalúa si cumple con las precondiciones de ayuda las cuales incluyen no haber pasado la estación de origen encontrarse a una distancia mínima y máxima de la estación, tener capacidad de ayuda entre otros. Posteriormente calcula su función costo- beneficio y envía dicho valor como oferta de ayuda a la estación.
Bus2Station HelpOffer	Bus	Estación	Este mensaje se envía cuando el bus detecta una oportunidad de ayuda debido a que tienen espacio disponible. La estación recibe el mensaje y evalúa la calidad de servicio y responde una aceptación o rechazo.
Bus2StationHelp Response	Bus	Estación	Este mensaje contienen un valor numérico que corresponde a la oferta de ayuda del bus y un atributo booleano el cual dice si el bus puede brindar ayuda. La estación espera mensajes de este tipo durante un intervalo de tiempo y almacena aquellos que provengan de buses que si pueden ayudar. Posteriormente, cuando el tiempo de espera a concluido, los organiza de mayor a menor y selecciona el de mayor oferta y responde a dicho agente aceptando su oferta.
Station2Bus HelpAcceptance	Estación	Bus	El bus al recibir este mensaje modifica su itinerario de paradas para adicionar aquellas estaciones a las que se comprometió en la negociación.
Bus2Station Contract Result	Bus	Estación	El bus envía un mensaje a la estación una vez que recoge los pasajeros en la estación de origen y ésta recalcula la calidad de servicio de la estación para evaluar si requiere más ayuda.

## V. INTELIGENCIA

Este capítulo aborda los elementos del modelo de inteligencia definido para los agentes. En primera instancia, se exponen los mecanismos que permiten obtener información sensorial del mundo, posteriormente, se plantea el proceso de transformación de dicha información en conocimiento a través del análisis de patrones de movilidad. Este conocimiento se fusiona con información capturada en tiempo real con el fin de evaluar la calidad de servicio del sistema y determinar necesidades u oportunidades de mejora; es este análisis el que impulsa al agente a actuar de manera colaborativa. Finalmente, se detallan las funciones costo-beneficio, las cuales son clave dentro de los protocolos de cooperación, pues permiten seleccionar las acciones más favorables para los pasajeros y el sistema en general.

### 1. Información de movilidad

La información de movilidad es uno de los elementos que le permite al sistema realizar una mejor toma de decisiones en base a datos actualizados de la demanda de viajes de los pasajeros. Para esto se plantea usar la información de las tarjetas de viaje. En algunos sistemas las personas solo deben marcar la tarjeta al ingresar a la estación; sin embargo, consideramos que para poder elaborar matrices origen-destino confiables en tiempo real es necesario que el pasajero también marque la tarjeta a la salida del sistema. Esta marcación doble ya es implementada en algunos países para ciertos sistemas de transporte y se han encontrado beneficios en cuanto a realizar un mayor control a la evasión de pago y para aplicar tarifas dinámicas que se determinan de acuerdo a la longitud del viaje y a la hora de uso del sistema. Las tarjetas de viaje deben contener un identificador único el cual permitirá reconocer al usuario dentro del sistema.

Para definir el histórico de viajes de un pasajero podemos utilizar las siguientes expresiones:

$$hv_i = (id_i, V_i) \quad (1)$$

$$V_i = \{v_1, v_2, v_3, \dots, v_n\} \quad (2)$$

$$v_{in} = (o_n, t_{no}, d_n, t_{nd}, cs_n) \quad (3)$$

- $hv_i$ : histórico de viajes del pasajero  $i$
- $id_i$ : identificador único del pasajero  $i$
- $V_i$ : conjunto de viajes realizados por el pasajero  $i$
- $v_{in}$ : viaje  $n$  realizado por la pasajero  $i$ , corresponde a una tupla de elementos
- $o_n$ : estación de origen del viaje  $n$
- $t_{no}$ : tiempo de marcación de entrada a la estación de origen del viaje  $n$
- $d_n$ : estación de destino del viaje  $n$
- $t_{nd}$ : tiempo de marcación de salida de la estación de destino del viaje  $n$
- $cs_n$ : medidas de calidad de servicio para el viaje  $n$

Por otro lado, en los vehículos se hace necesario determinar la ocupación a lo largo de su recorrido. Debido a que en un sistema BRT los buses no cuentan con torniquetes o sistema de pago abordo se requiere de otras estrategias, para ello se plantea la incorporación de sistemas de conteo automático de pasajeros (APC en inglés) en las entradas de los buses. Estos elementos funcionan con sensores infrarrojos que poseen gran efectividad [45]–[47] determinando cuantos pasajeros abordaron y cuantos descendieron y por ende estimar la ocupación del bus. Este tipo de sensores ya han sido implementados en otros países con el fin de tener mayor control en el servicio.

## 2. Análisis de patrones de movilidad

Para que el sistema pueda ofrecer un servicio de transporte de calidad es necesario conocer los requerimientos de movilidad de los pasajeros, de esta manera, el sistema puede dirigir los esfuerzos operativos en satisfacer dichas necesidades administrando eficientemente sus recursos. Dicho esto, una alternativa de solución es que el pasajero cada vez que quiera realizar un viaje en el sistema informe cuál es la estación de destino; sin embargo, vemos que es una alternativa con diferentes inconvenientes, en primer lugar debido a la necesidad de un dispositivo que permita capturar esta información. Si bien puede desarrollarse una aplicación móvil para este propósito, sería requerimiento fundamental tenerla instalada para poder usar el sistema, por otro lado, debe ser robusta a posibles errores humanos a la hora de utilizarla, factores que pueden generar malestar en el usuario y baja aceptación del sistema. De utilizar un dispositivo en las estaciones, se generarían colas en las entradas mucho mayores a las actuales debido a que el tiempo de paso por los torniquetes aumentaría por la selección del destino, lo cual también generaría gran malestar en los pasajeros. Es aquí donde tiene importancia el análisis de patrones de movilidad.

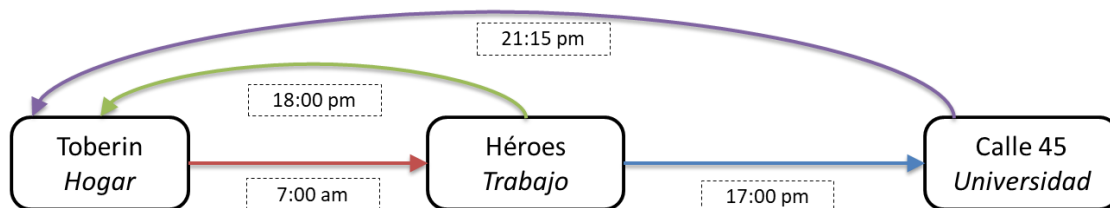
El propósito del análisis de patrones de movilidad es establecer un modelo de conocimiento que permita hacer una predicción de los requerimientos de viaje del pasajero cada vez que éste requiera realizar un viaje sin necesidad de que lo informe explícitamente. De igual manera, también provee de otras ventajas ya que al poseer información de viajes desagregados por pasajero se pueden obtener modelos de demanda más confiables.

El análisis de patrones de movilidad puede desarrollarse de diversas aproximaciones, aplicando diferentes técnicas y metodologías existentes cada una con sus ventajas y desventajas y con la facultad de brindar información y conocimiento diferente. Por ejemplo, tomando una aproximación de minería de datos o de inteligencia de negocios, es posible generar diferentes modelos que permitan responder preguntas, encontrar información novedosa o contribuir a la mejora de los procesos de la organización. En el caso de un sistema de transporte, por ejemplo, puede resultar bastante útil en el diseño de los servicios y demás procesos de la organización. Es de aclarar, que la mayoría de las veces la aproximación anterior exige la supervisión constante por parte de personas con experiencia en el modelo de negocio y son estos quienes finalmente toman la decisión de qué hacer con el conocimiento generado, es decir, requiere en gran proporción de intervención humana. Por otro lado, tenemos la aproximación de la inteligencia artificial y el aprendizaje de máquina donde el sistema es provisto de un modelo que le permite ser totalmente autónomo en las decisiones y acciones que realiza. No podemos desmeritar una

de la otra, sin embargo, para el diseño de nuestro sistema nos inclinamos por la segunda opción con el propósito de tener un sistema totalmente autónomo. No obstante, invitamos a que el lector u otros interesados exploren diferentes opciones y estrategias que permitan enriquecer el modelo presentado en este trabajo.

Según Ortúzar [26][27], la demanda de transporte es derivada, es decir, las personas se movilizan de un origen a un destino en un tiempo del día determinado utilizando un modo de transporte con el propósito de realizar una actividad, por ejemplo, trabajar, estudiar, ir al médico, ir de compras, etc. Es difícil ignorar que el comportamiento del ser humano posee una tendencia a los hábitos, pues en general realiza ciertas actividades a determinada hora con cierta frecuencia, e incluso nuestra sociedad está ligada fuertemente a los horarios, por ejemplo, en el trabajo, en el estudio, entre otros. Es así que se determinó enfocar el análisis de patrones en nuestro sistema precisamente en detectar los hábitos de viaje de los pasajeros mediante el análisis de las entradas y salidas del sistema en cada viaje que realiza. Este será el insumo que le permitirá al sistema determinar que tan bien atiende los requerimientos de movilidad de los pasajeros y poder tomar acciones en pro de brindar un mejor servicio.

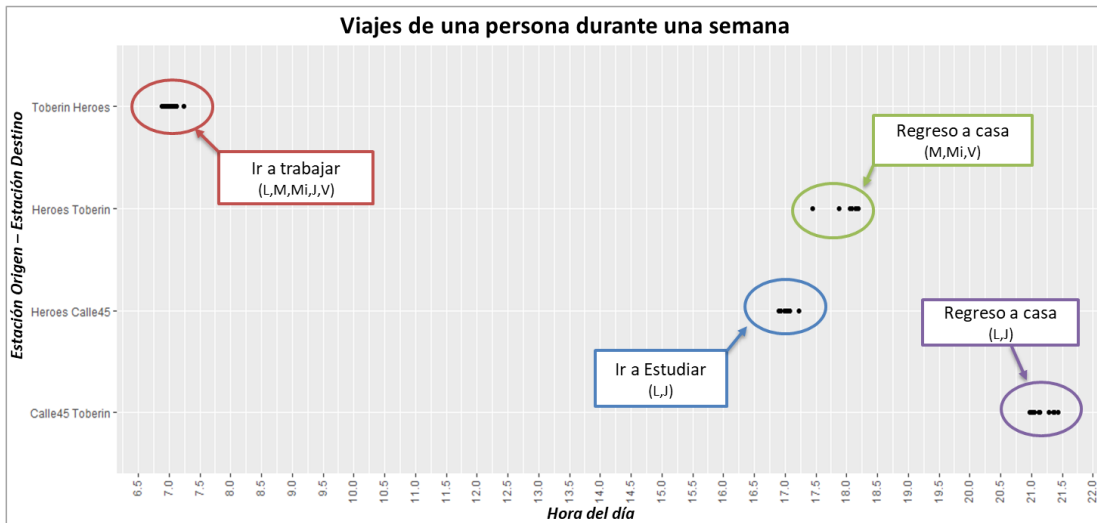
En la Figura 7 podemos observar un ejemplo ilustrativo de los viajes realizados por una persona durante una semana, claramente se puede apreciar que el individuo se moviliza principalmente entre las estaciones de Toberín, Héroes y Calle 45 y que adicionalmente existe un hábito en la hora de inicio del viaje de acuerdo a la actividad que va a desempeñar. Podemos establecer que si la persona ingresa a la estación de Toberín con gran seguridad se dirigirá a la estación de los Héroes. Por otro lado si ingresa a la estación Héroes existen dos posibles destinos regresar a la estación Toberín para ir a su casa o por otro lado, los días que tiene clases en la universidad se dirigirá a la estación Calle 45, podríamos utilizar la hora de inicio del viaje como elemento que permite diferenciar a cuál destino se dirigirá este individuo. Finalmente, si el individuo ingresa a la estación Calle 45 con gran certeza se dirigirá a la estación Toberín para regresar a su casa.



**Figura 7.** Diagrama de los viajes realizados por una persona durante una semana.

La Figura 8 presenta, desde otra perspectiva, los viajes del individuo del ejemplo anterior a lo largo de una semana. Cada punto del gráfico corresponde a la hora de inicio del viaje entre un par origen-destino.





**Figura 8.** Visualización de los viajes realizados por una persona durante una semana.

Aquí se puede distinguir fácilmente la concentración de puntos para cada par origen-destino a lo largo del día, lo cual sugiere que aplicando técnicas de clustering podemos encontrar estos patrones de movilidad y finalmente concebir reglas como la presentada en la expresión (4). Dicha regla se entiende como: dado que una persona ingresó a la estación  $x$  (origen del viaje) en el tiempo  $t$ , entonces, su estación de destino será  $d$  (destino del viaje) con una probabilidad  $p$ .

$$(\text{origen} = x) \wedge (\text{tiempo} = t) \Rightarrow (\text{destino} = d), \text{ prob} = p \quad (4)$$

### 3. Predicciones de destino del viaje

En base al análisis del histórico de viajes de una persona el sistema tiene la capacidad de predecir el destino del viaje cada vez que dicho individuo ingresa al sistema. Esto le permite tener un monitoreo de las necesidades de movilidad de los pasajeros para posteriormente evaluar qué tan bien atiende dicha demanda. Para este proceso se contempló inicialmente el uso de algoritmos de clustering tales como el DbScan o K-means. Sin embargo, se puede observar que los datos de movilidad no tienen comportamientos o configuraciones demasiado caóticos difícilmente separables como en otro tipo de problemas donde se hace vital el uso de un algoritmo como DbScan. Por otro lado, se consideró el algoritmo EM esperanza-maximización el cual también se usa en agrupamiento de datos para estimar modelos probabilísticos que separen datos siguiendo distribuciones gaussianas. Igual que los anteriores, su funcionamiento radica en un ciclo iterativo donde se va minimizando el error hasta cierto criterio de parada.

Esta característica iterativa de estos algoritmos tiene la desventaja de que su tiempo de procesamiento es elevado agregando que se debe procesar cada persona individualmente, lo cual exige bastantes recursos de cómputo para aplicarlo a la gran cantidad de pasajeros de un sistema BRT. Finalmente, realizando una exploración de los datos y en base a conocimiento

del modelo de negocio se pudo definir un algoritmo que emplea una serie de heurísticas para poder obtener el resultado deseado con bajos requerimientos de recursos computacionales. Este algoritmo se presenta a continuación:

### Algoritmo 1. Predicción de destino de viaje para un pasajero

**Entrada:**  $(i, o, t)$  = (id del pasajero, estación de origen, tiempo de ingreso a la estación de origen)  
**Salida:**  $ed$  = estación de destino

```

1:  $hi \leftarrow$  viajes del pasajero  $i$ 
2: if  $size(hi) > 0$ 
3:    $c \leftarrow$  conteo de viajes del pasajero  $i$  en la estación de origen  $o$ , agrupados por origen y destino
4:   if  $size(c) == 1$ 
5:      $ed \leftarrow$  único destino en  $c$ 
6:   else
7:     if  $size(c) == 0$ 
8:        $c \leftarrow$  conteo de viajes del pasajero  $i$  agrupados por destino
9:        $s \leftarrow$  soporte para cada par origen destino en  $c$ 
10:       $m \leftarrow$  media de tiempo de inicio de viaje para cada par origen destino en  $c$ 
11:       $j \leftarrow$  distancia entre  $t$  y  $m$  de cada par origen destino en  $c$ 
12:       $p \leftarrow s \cdot j$ 
13:       $ed \leftarrow argmax(p)$ 
14:    else
15:       $tmin \leftarrow (t - \alpha)$ 
16:       $tmax \leftarrow (t + \alpha)$ 
17:       $c \leftarrow$  conteo de viajes en la estación de origen  $o$ , entre los tiempos  $tmin$  y  $tmax$  agrupados por destino
18:       $s \leftarrow$  soporte para cada par origen destino en  $c$ 
19:       $ed \leftarrow$  selección de ruleta ( $s$ )
20:    return  $ed$ 

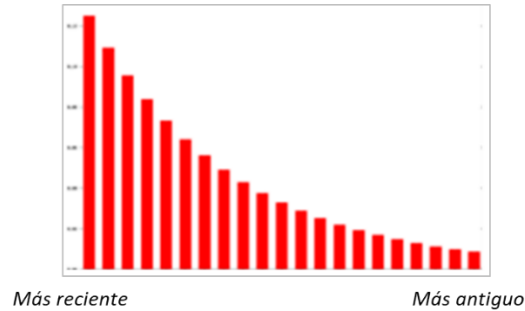
```

El algoritmo se apoya en las técnicas de minería de datos de reglas de asociación que usualmente se emplea en “Market basket analysis”, el cual hace uso de conteos y medidas de frecuencia para determinar reglas o patrones de comportamiento. En el algoritmo se obtienen medidas de frecuencia para los diferentes pares origen-destino y se calcula el soporte de la regla con la ecuación (5), donde el soporte de un par origen-destino está dado por la proporción de viajes de dicho origen a dicho destino sobre el total de viajes del pasajero. Cuando hay una persona que no tiene información de patrones, el sistema hace una selección de ruleta tomando el soporte de cada par origen-destino como probabilidades. Se realizó una prueba para determinar la precisión del algoritmo con datos sintéticos y se obtuvo un porcentaje de aciertos del 84.3%.

$$soporte(o, d) = \frac{freq(o, d)}{N} \quad (5)$$

Otro aspecto a tener en cuenta es que las personas con el tiempo cambian de hábitos, pueden cambiar de lugar de residencia, lugar de trabajo, lugar de estudios, pueden variar en el tiempo los turnos de trabajo o en el caso de los estudiantes cada semestre pueden tener un horario de clases diferente. Con el fin de que el sistema sea robusto a dichos cambios se plantea una estrategia en donde el sistema asigne una atenuación o envejecimiento a los datos en relación al tiempo transcurrido con el fin de que en el análisis se le dé mayor importancia a los datos recientes y menor importancia a los datos más antiguos. Para ello se emplea una función similar a la utilizada en el promedio móvil exponencial como se observa en la Figura 9 la cual

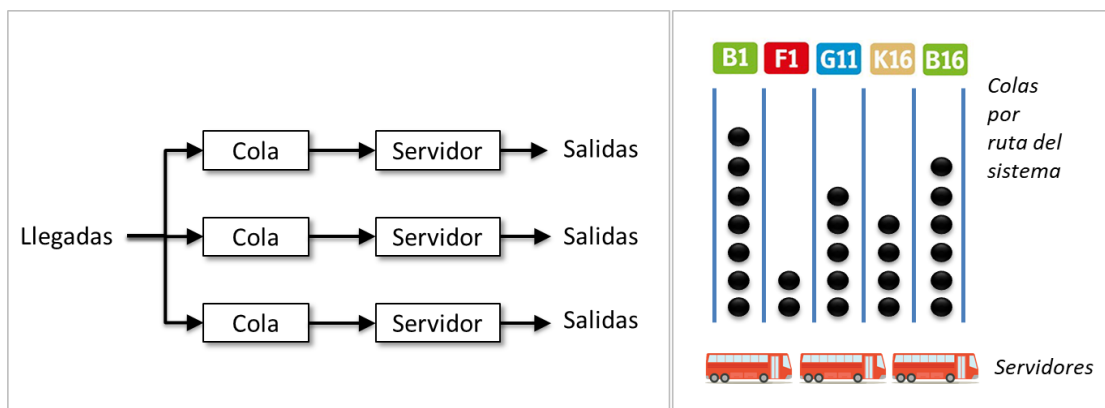
permite darle esta característica de envejecimiento a los datos. Adicionalmente, cuando el registro ha excedido un tiempo determinado, éste se eliminará de la base de datos con el fin de hacer uso eficiente de los recursos de almacenamiento de información.



**Figura 9.** Importancia de los datos de viaje en relación al tiempo transcurrido desde su registro en el histórico.

#### 4. Medidas de calidad del servicio

Hasta este punto el sistema es capaz de predecir la estación de destino de viaje para cada pasajero una vez que éste ingresa a una de las estaciones del sistema. Ahora es necesario evaluar qué tan bien atiende dicha demanda de viajes o en otras palabras la calidad del servicio. En caso de que haya una falencia en la atención, es decir una baja calidad de servicio, el sistema detecta una necesidad de mejorar con lo cual iniciará los protocolos de ayuda de los agentes. El mecanismo de evaluación de la calidad de servicio se inspira en la teoría de colas, y se ilustra en la Figura 10. El tipo de sistema de colas corresponde a múltiples colas con múltiples servidores (en notación Kendall M/M/k) donde el número de colas corresponde al número de rutas que se detienen en la estación y los servidores corresponden a los buses del sistema asignados a cada ruta.



**Figura 10.** Ilustración de las colas y servidores en el sistema.

Las medidas de calidad de servicio que calcula la estación están relacionadas en las siguientes ecuaciones:

$$\text{Tasa de llegadas : } \lambda = \frac{\text{pasajeros ingresados}}{\text{tiempo}} \quad (6)$$

$$\text{Tasa de servicio : } \mu = \frac{\text{pasajeros atendidos}}{\text{tiempo}} \quad (7)$$

$$\text{Factor de utilización : } U = \frac{\lambda}{\mu} \quad (8)$$

$$\text{Tiempo promedio de espera en la cola : } qwt = \frac{1}{N} \sum_i wt_i \quad (9)$$

$$\text{Desempeño : } \varphi = \left( \alpha \cdot \frac{U}{U_o} \right) + \left( (1 - \alpha) \cdot \frac{qwt}{qwt_o} \right) \quad (10)$$

donde,

- $wt_i$  : tiempo de espera de la persona  $i$  en la cola
- $N$  : número de personas en la cola
- $\alpha$  : factor de ponderación aplicado a la utilización y el tiempo de espera [0,1]
- $U_o$  : utilización de los servidores deseada por el administrador del sistema
- $qwt_o$  : tiempo de espera promedio en la cola deseado por el administrador del sistema

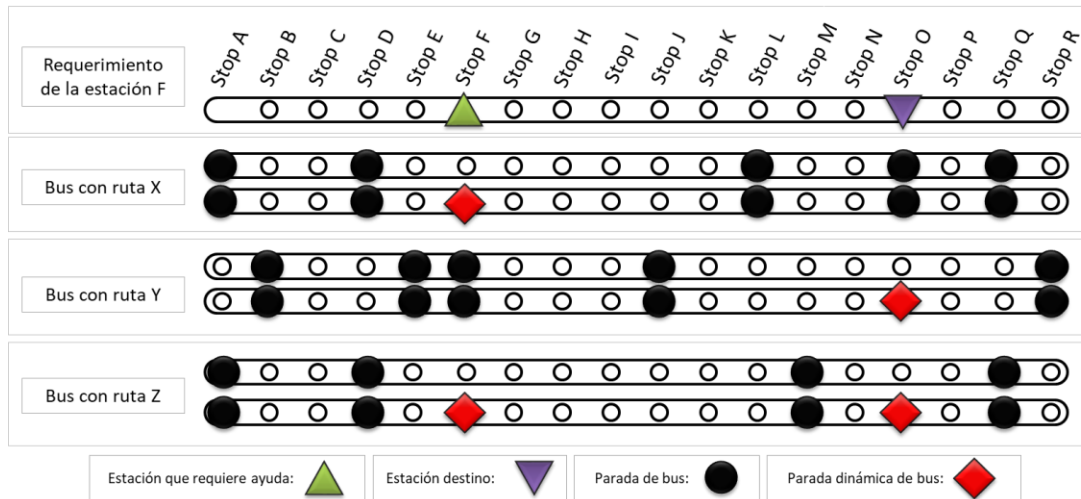
Las primeras ecuaciones provienen de la teoría de colas. La última ecuación es propuesta por nosotros y es la que finalmente permite obtener un valor de calidad de servicio, pues determina el desempeño de la ruta para atender la demanda de pasajeros. Ésta es parametrizada por el administrador del sistema en cuanto a los valores deseados para  $\alpha$ ,  $U_o$  y  $qwt_o$ . En la variable desempeño, valores inferiores a 1 representan una buena calidad de servicio y a medida que el valor incrementa por encima de 1 la calidad de servicio decrece. Es en este punto cuando la estación inicia los protocolos de solicitud de ayuda a los buses para que estos agreguen paradas adicionales y poder atender la demanda de pasajeros represada.

## 5. Funciones costo-beneficio

Dentro de los protocolos de ayuda de los agentes las funciones costo-beneficio cumplen un papel fundamental ya que permiten seleccionar las acciones más favorables para los pasajeros y la agencia de transporte dado un determinado estado del sistema.

Antes de definir las funciones costo-beneficio podemos describir las opciones de ayuda entre los agentes, básicamente se identifican 3 aproximaciones diferentes y se describirán utilizando un ejemplo como se ilustra en la Figura 11. En la parte superior de la imagen tenemos el requerimiento o necesidad de la estación “F” (en verde) para movilizar una cantidad deter-

minada de pasajeros que tienen como destino la estación “O” (en morado). Para dicha necesidad se inició un protocolo de ayuda en búsqueda de un bus que pueda transportar los pasajeros para lo cual 3 buses con rutas diferentes se postulan como candidatos. El primer bus se encuentra realizando la ruta X, el segundo la ruta Y, y el tercero la ruta Z, las cuales tienen paradas diferentes. Para cada bus podemos observar en la parte superior la ruta original de su recorrido y en la parte inferior las modificaciones que debe hacer para poder ayudar a la estación a movilizar los pasajeros.



**Figura 11.** Ilustración de opciones de ayuda entre los buses y las estaciones.

Para el primer bus observamos que solo requiere agregar una parada dinámica en la estación “F” debido a que en su recorrido ya tiene previsto detenerse en la estación “O”. El segundo bus, por el contrario, ya tienen contemplado parar naturalmente en la estación “F” y requiere agregar una parada dinámica en la estación “O”. Finalmente, el último bus, requiere agregar ambas paradas ya que ninguna está contemplada en su ruta original. Así describimos los tres tipos de ayuda que se pueden presentar, sin lugar a duda, de acuerdo a la situación del sistema puede que una opción sea más beneficiosa que otra, adicionalmente, en el análisis se deben incluir otro tipo de variables que también impactan en el desempeño del sistema. Es aquí donde las funciones costo-beneficio ofrecen un mecanismo de toma de decisiones confiable.

Una función de costo-beneficio relaciona los impactos positivos y negativos que puede conllevar realizar una acción en determinada situación. Es necesario tener en cuenta la perspectiva de los actores que están involucrados en las acciones, para el caso del sistema de transporte se toman los puntos de vista del pasajero y de la agencia de transporte. Dentro de la función, los factores de costo tienen un valor negativo mientras que los factores de beneficio tienen un valor positivo, finalmente, al sumarlos se obtiene un número positivo o negativo. Durante el protocolo de ayuda, la estación después de recibir las propuestas de diferentes buses debe seleccionar aquella con mayor valor, es decir, la que ofrece el mayor beneficio posible, dadas las situaciones actuales del sistema.

Para evaluar el impacto de incorporar paradas adicionales en las rutas de los buses se propone la ecuación (11) la cual determina el costo-beneficio del bus  $i$  para detenerse en la estación  $j$  y llevar pasajeros a la estación  $k$ . Este cálculo se realiza para los buses que cumplan como condición no haber sobrepasado las estaciones  $j$  y  $k$  y viajar en la dirección donde  $j < k$ .

$$CB_{ijk} = -w_1 \cdot tvb_{ijk} - w_2 \cdot tva_{ijk} - w_3 \cdot tapdp_i - w_4 \cdot ta_{ij} \quad (11)$$

$$tvb_{ijk} = tdpe \cdot pb_{ijk} \cdot nppb_{ijk} \quad (12)$$

$$tva_{ijk} = tdpe \cdot pdn_{ijk} \cdot npab_i \quad (13)$$

$$tapdp_i = tdpe \cdot pda_{ijk} \cdot npab_i \quad (14)$$

$$ta_{ij} = \frac{db_{ij}}{vb_i} \cdot npab_i \quad (15)$$

$$tdpe = (tad + tpad) \quad (16)$$

donde,

- $CB_{ijk}$ : Costo-beneficio del bus  $i$  para detenerse en la estación  $j$  y llevar pasajeros a la estación  $k$ .
- $w_n$ : Factores de ponderación de cada uno de los elementos de costo.
- $tvb_{ijk}$ : Tiempo de viaje de los pasajeros beneficiados de la estación  $j$ .
- $tva_{ijk}$ : Incremento en el tiempo de viaje de los pasajeros actuales del bus  $i$  por adicionar  $n$  paradas dinámicas en  $j$  y  $k$ .
- $tapdp_i$ : Tiempo de viaje adicional generado por paradas dinámicas adicionadas previamente a la ruta del bus  $i$ .
- $ta_{ij}$ : Tiempo estimado de arribo del bus  $i$  a la estación  $j$ .
- $tdpe$ : Tiempo promedio de parada en una estación para recoger o dejar pasajeros.
- $pb_{ijk}$ : Número de paradas en la ruta del bus  $i$ , entre las estaciones  $j$  y  $k$ .
- $nppb_{ijk}$ : Cantidad de pasajeros a beneficiar por el bus  $i$  y que desean viajar entre las estaciones  $j$  y  $k$ .
- $pdn_{ijk}$ : Número de paradas dinámicas nuevas a agregar por el bus  $i$  en la negociación.
- $npab_i$ : Número de pasajeros a bordo del bus  $i$ .
- $pda_{ijk}$ : Número de paradas dinámicas adicionadas previamente a la ruta del bus  $i$ .
- $db_{ij}$ : Distancia entre el bus  $i$  y la estación  $j$ .
- $vb_i$ : Velocidad promedio del bus  $i$ .
- $tad$ : Tiempo promedio de desaceleración y aceleración del bus al detenerse en una estación.
- $tpad$ : Tiempo promedio de ascenso y descenso de pasajeros en la estación.

El resultado de la función es una medida de tiempo expresada en segundos, la razón por la cual todos los factores restan dentro de la función es debido a que si bien si se existen factores de beneficio, fue más fácil expresarlos en términos de tiempo desde el punto de vista de un costo. Los factores incorporados no son los únicos que se pueden manejar, para esta versión del sistema se plantean estos y posteriormente como trabajo a futuro se puede trabajar en enriquecer la función con otras variables, por ejemplo, incluir información contextual del comportamiento de la demanda o diferentes tipos de predicciones de estado en los buses y estaciones.

## 6. Servicios de ruta 100% dinámica

El funcionamiento de los servicios de ruta completamente dinámica es bastante similar al de los servicios de ruta fija que incorporan paradas dinámicas. En los dos casos los buses agregan una parada dinámica producto de una negociación con una estación, la diferencia radica en que los servicios de ruta fija ya tienen una ruta base predefinida con antelación mientras que los servicios 100% dinámicos no poseen una ruta definida. Es más, los buses inicialmente se ubican en puntos estratégicos a lo largo de las troncales y se mantienen allí sin moverse, sin embargo, participan dentro de las negociaciones con las estaciones y es hasta que uno de ellos gana una negociación que este comienza a moverse y a generar su ruta en la medida en que gana más negociaciones. De esta manera, su ruta es emergente y después de llegar al terminus vuelve a ubicarse en uno de los puntos estratégicos a lo largo de la red vial para estar disponible a nuevas negociaciones; así, estos buses no consumirán combustible si no es necesario moverse. Los puntos estratégicos de ubicación de los buses deben ser definidos por la agencia de transporte, sin embargo, no se descarta la posibilidad de en un futuro incorporar un módulo que se encargue de analizar la topología de la red vial y determinar de manera automática los puntos estratégicos más convenientes.

## 7. Reglas complementarias

Es posible que en el sistema eventualmente se pueden dar situaciones donde los buses terminen transformándose en servicios locales que se detienen en todas las estaciones lo cual no es del todo deseable. Por lo cual se da la posibilidad de configurar el porcentaje de paradas dinámicas que puede agregar un bus. Inicialmente se propone que el valor sea la mitad de estaciones donde originalmente el bus no se detiene en su recorrido. Es decir, si un bus en su recorrido pasa sin detenerse por 6 estaciones, sólo podrá agregar como paradas dinámicas a 3 de ellas.

Por otro lado, se plantea otro parámetro de configuración el cual se define como la solidaridad de los buses con servicios de ruta fija para ayudar a las estaciones. Ese nivel de solidaridad corresponde a un porcentaje, donde 0% significa un egoísmo total, donde el bus nunca ayuda las estaciones y un valor de 100% corresponde al máximo de solidaridad, es decir que éste ofrecerá ayuda en todos los casos donde cumpla las precondiciones establecidas por la estación.

## VI. IMPLEMENTACIÓN Y SIMULACIÓN

Para la etapa de evaluación del proyecto se realiza una implementación en software que permita simular un sistema BRT con sus características principales; para ello se toma como caso de referencia el sistema Transmilenio de la ciudad de Bogotá. Este capítulo presenta los detalles más relevantes de la implementación y simulación, abordando aspectos como la arquitectura de software, algoritmos y modelos usados, la generación de la planeación de servicios de ruta fija y la generación sintética de la población junto con sus actividades y viajes a realizar.

### 1. Simulador de tráfico

En el área de investigación de sistemas de transporte es de gran utilidad el uso de simuladores de tráfico a la hora de evaluar diferentes tipos de proyectos. La industria cuenta con una gama diversa de simuladores, se tienen los de uso comercial (los cuales en ocasiones ofrecen licencias educativas restringidas) y por otro lado se tienen los de licencia de software libre. En general, estas herramientas presentan dos niveles de análisis: microscópico y macroscópico. Los microscópicos modelan individualmente los vehículos en el sistema de transporte, lo cual permite tener un mejor detalle de sus dinámicas y comportamiento. Por otro lado, los macroscópicos analizan grupos de elementos o componentes de mayor tamaño como dinámicas de flujo de tráfico o análisis de demanda por zonas. Los modelos microscópicos brindan un mayor nivel de detalle, sin embargo, su debilidad es el alto costo computacional al evaluar cada uno de los elementos en cada instante de la simulación.

En nuestro caso, hemos definido 3 requerimientos iniciales en el proceso de selección del simulador. El primero es el tipo de licencia, por lo cual nos enfocaremos en software libre, el segundo es el nivel de análisis, donde hemos seleccionado microscópico debido a que se necesita un control detallado del comportamiento de los vehículos. Y finalmente el tercer criterio es la posibilidad de interacción y control del simulador a través de código propio. La Tabla 5 presenta las características básicas tenidas en cuenta en la selección del simulador a emplear.

**Tabla 5.** Características de los simuladores candidatos

	<b>SUMO</b> [48]	<b>TRANSIMS</b> [49]	<b>MATSIM</b> [50]
<i>Categoría de software</i>	Libre	Libre	Libre
<i>Visualización</i>	Integrada	Integrada	Externa propietaria
<i>Interfaz de control</i>	Si	Si	Si
<i>Control de vehículos</i>	Alto	No específica	Medio
<i>Soporte y documentación</i>	Alto	Bajo	Alto

De acuerdo a nuestros criterios de selección y las características de nuestro proyecto, se selecciona el simulador Sumo principalmente por la posibilidad que ofrece de control sobre los vehículos y por el soporte, documentación y actividad actual del proyecto. Según la información que se obtuvo acerca de Transims, se encontraron debilidades en la documentación y baja

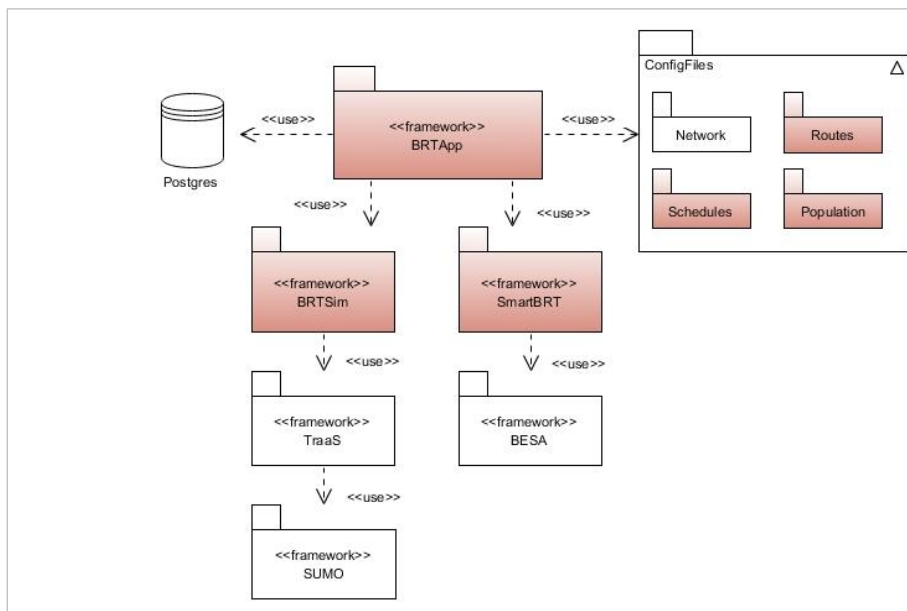


actividad del proyecto. Finalmente, Matsim se considera como una buena opción para simulación, sin embargo, está más enfocado al comportamiento de los individuos junto con sus actividades y no provee un control detallado sobre los vehículos.

Sumo [51] es un simulador microscópico de código abierto que tuvo inicios en 2001. Ofrece diferentes herramientas que permiten la generación de la malla vial para la simulación, soportando diferentes tipos de formatos. Está desarrollado en C++ y permite la integración con Matlab, Python y java a través de una conexión por sockets. Ha sido empleado en un sinnúmero de proyectos y tienen una amplia comunidad de respaldo.

## 2. Implementación

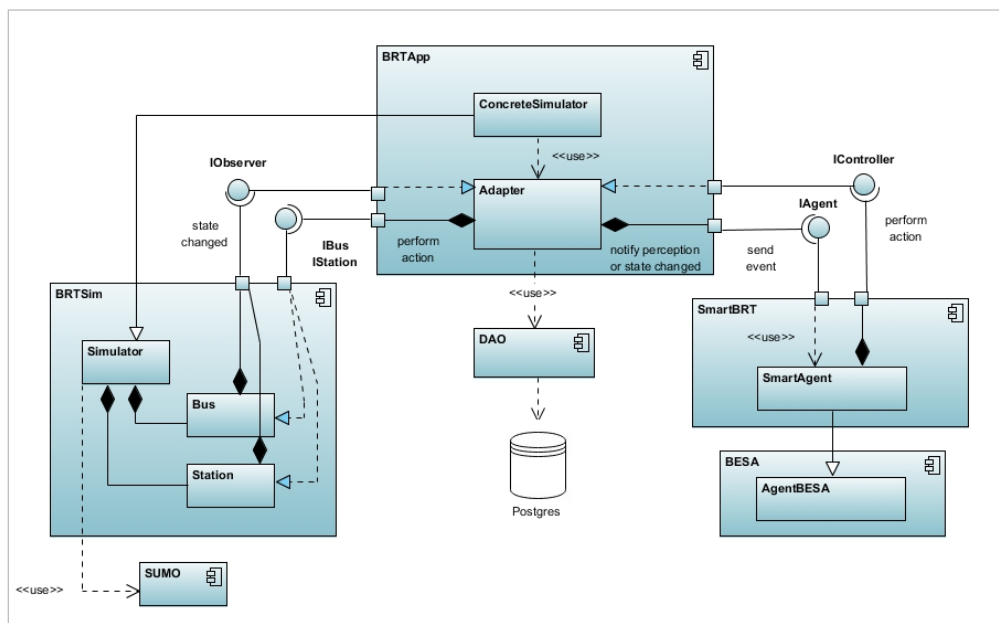
La implementación del sistema se realizó utilizando el lenguaje Java. En la Figura 13 se detalla el diagrama general de paquetes que conforman toda la aplicación. Los elementos sombreados en rojo fueron desarrollados en este trabajo mientras que los elementos sin color son frameworks desarrollados por terceros. El paquete Sumo corresponde al simulador de tráfico el cual está implementado en C++, éste provee una interfaz de comunicación denominada Traci (Traffic Control Interface) a la cual se accede a través de sockets utilizando el framework TraaS que está implementado en lenguaje Java. El paquete BRTSim se puede interpretar como una capa de alto nivel del simulador el cual se enfoca en proveer las características propias de un sistema BRT junto con el comportamiento de los vehículos, las estaciones y los pasajeros. Este posee toda la lógica del ciclo de simulación, los elementos que se encuentran en el mundo, la manera en que interactúan, y los módulos de carga de los archivos de configuración de la malla vial y las rutas de los buses.



**Figura 12.** Diagrama general de paquetes

El framework BESA fue desarrollado en la Pontificia Universidad Javeriana y provee las clases base para implementar un sistema multiagente, estas clases son extendidas por el paquete SmartBRT el cual posee la lógica de los agentes que se describieron previamente (capítulo del sistema multiagente), adicionalmente implementa los respectivos protocolos y mecanismos deliberativos especificados. Los paquetes BRTSim y SmartBRT no poseen vínculos directos entre sí y requieren de una capa de alto nivel que les permita conectarse, esta capa es BRTApp, y es aquí donde el programador puede crear diferentes escenarios de simulación cada uno con características propias. BRTApp también tiene la responsabilidad de cargar los archivos de configuración y delegarlos a los componentes respectivos que los requieran. Los archivos de la malla vial y las estaciones (network) siguen la definición requerida por Sumo en formato XML mientras que los demás archivos (schedules, routes & population) son utilizados por BRTApp y BRTSim y siguen un formato json.

La Figura 13 presenta un diagrama de mayor detalle con los componentes principales de la arquitectura del sistema. En primera instancia se puede observar el uso de interfaces para permitir desacoplar los módulos y el uso del patrón observador para hacer la comunicación entre los componentes mediante una aproximación de eventos.



**Figura 13.** Diagrama básico de componentes principales

En el componente BRTApp existen dos elementos importantes, el primero es la definición del simulador de acuerdo a las características específicas del escenario que se desee modelar, este es una extensión del elemento simulador del componente BRTSim. El segundo elemento es un conjunto de adaptadores los cuales permiten conectar BRTSim y SmartBRT, los adaptadores implementan una serie de interfaces con un contrato especificado por los demás módulos; estos se subscriben como observadores (IObserver) a los elementos bus, estación y pasajero y reciben los eventos que corresponden por ejemplo a la llegada de un bus a una estación, al

ingreso y salida de pasajeros del bus, ingreso y salida de pasajeros de la estación, inicio y finalización del recorrido del bus, entre otros. La información de dichos eventos es enviada a los agentes a través del envío de mensajes a sus respectivas guardas, estos inician sus procesos deliberativos y se comunican entre ellos de acuerdo a los protocolos de interacción. Finalmente, cuando un agente desea realizar una acción en el simulador, utiliza la interfaz IController la cual implementa el adaptador, posteriormente, el adaptador utiliza la interfaz de acceso al bus o a la estación llamando el servicio requerido. El adaptador también posee la responsabilidad de registrar en la base de datos los eventos que se requieran utilizando un componente de acceso a datos.

### 3. Detalles relevantes de implementación

#### 3.1. Algoritmo A\*

Debido a que la ruta de un bus solo especifica las estaciones de parada más no las vías por las que debe desplazarse se tuvo la necesidad de aplicar un algoritmo de búsqueda de ruta que determinara el conjunto ordenado de aristas del grafo de la red vial. Para esto se empleó el algoritmo A\* (a estrella) debido a que ya se había trabajado con él en proyectos anteriores obteniendo buenos resultados.

#### 3.2. Tiempo de ascenso, descenso y parada de bus

El tiempo de ascenso y descenso en la parada de un bus en una estación tiene un alto impacto en el desempeño del sistema por lo cual no se le puede ignorar. Para el simulador se utilizó el modelo planteado en Transit Capacity and Quality of Service Manual [52].

$$\text{dwell time} : \quad t_d = P_a t_a + P_b t_b + t_{oc} \quad (17)$$

- $P_a$  y  $P_b$ : Conteo de pasajeros descendiendo y ascendiendo del bus respectivamente
- $t_a$  y  $t_b$ : Tiempo de servicio de descenso y ascenso de pasajeros
- $t_{oc}$ : Tiempo de apertura y cierre de las puertas del bus

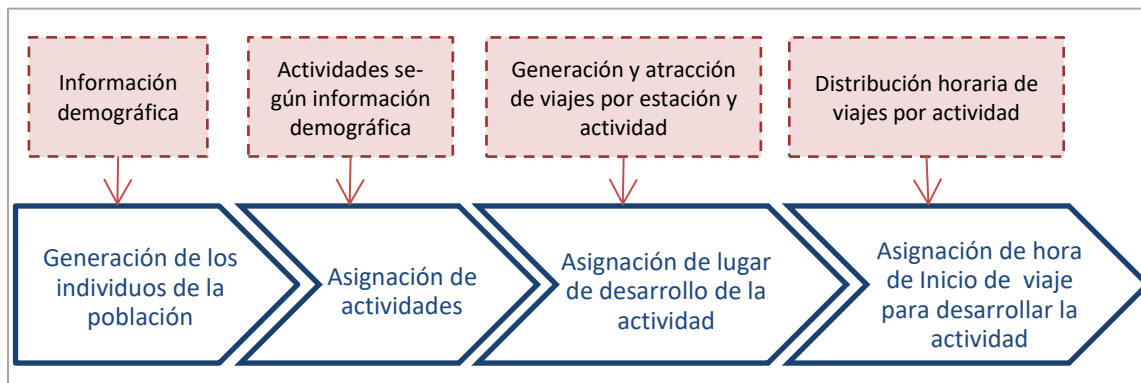
Dado que los buses articulados del sistema Transmilenio cuentan con 4 puertas y según la tabla provista por el manual se tomaron los valores de 1.1 y 0.9 para los tiempos de servicio  $t_a$  y  $t_b$ .

#### 3.3. Planeación de servicios de ruta fija

Debido a la dificultad de obtener una programación de buses real, se optó por realizarla manualmente utilizando el enfoque presentado por Boyle et al. [28]. Se creó una herramienta en Python la cual realiza el mismo proceso descrito en el manual. En la actualidad, paquetes de software como GoalBus, entre otros, son capaces de generar la programación de buses optimizando diferentes elementos como los recorridos en vacío, los horarios de trabajo de los empleados, entre otros elementos que nos tenidos en cuenta para este trabajo debido a su complejidad.

## 4. Datos sintéticos

En la metodología del trabajo de investigación se planteó realizar la evaluación a través de la simulación de un tramo del sistema Transmilenio, para este proceso no es suficiente con modelar las características espaciales de la infraestructura y la red vial sino también se debe tener una buena representación de los viajes y la demanda de transporte. Para ello se definió un modelo que se descompone en cuatro pasos como se muestra en la Figura 14. En el primer paso se genera la población de individuos en base a información demográfica de la ciudad, posteriormente, a cada individuo le se asignan las actividades que realiza en relación a su ocupación e información demográfica. El tercer paso es asignar el lugar de desarrollo de la actividad teniendo en cuenta probabilidades de generación y atracción de viajes para cada una de las actividades definidas en el modelo y finalmente se asigna la hora de inicio del viaje en base a información de encuestas sobre distribución horaria de viajes por actividad.



**Figura 14.** Modelo de generación de datos sintéticos.

Podemos definir la población  $P$  como un conjunto de individuos  $p_i$ , cada individuo posee como atributos la edad  $e$ , el estrato  $s$ , la ocupación  $o$ , la estación más cercana a su residencia  $es_{res}$ , la estación más cercana a su lugar de trabajo  $es_{tra}$ , la estación más cercana a su lugar de estudio  $es_{est}$  y el conjunto de actividades que desempeña en el transcurso del día. Una actividad contiene la hora de inicio del viaje para realizar la actividad  $t_{inicio}$ , y la estación  $es$  más cercana al lugar donde desempeña la actividad.

$$poblacion: P = \{p_1, p_2, p_3, \dots, p_i\} \quad (18)$$

$$p_i = (e, s, o, es_{res}, es_{tra}, es_{est}, A_i) \quad (19)$$

$$A_i = (a_1, a_2, a_3, \dots, a_j) \quad (20)$$

$$a_j = (t_{inicio}, es_j) \quad (21)$$

Para generar la población en nuestra simulación se empleó información de las encuestas de movilidad realizadas en la ciudad de Bogotá junto con los reportes de indicadores anuales y mensuales que generan diferentes entidades.

**Tabla 6.** Distribución de usuarios de Transmilenio por estrato [53].

Estrato	Estrato 1	Estrato 2	Estrato 3	Estrato 4	Estrato 5	Estrato 6
%	5%	29%	36%	17%	7%	6%

**Tabla 7.** Distribución de usuarios de Transmilenio por edad [53].

Edad	15 - 24	25 - 34	35 - 44	45 - 54	55 - más
%	27%	21%	15%	14%	23%

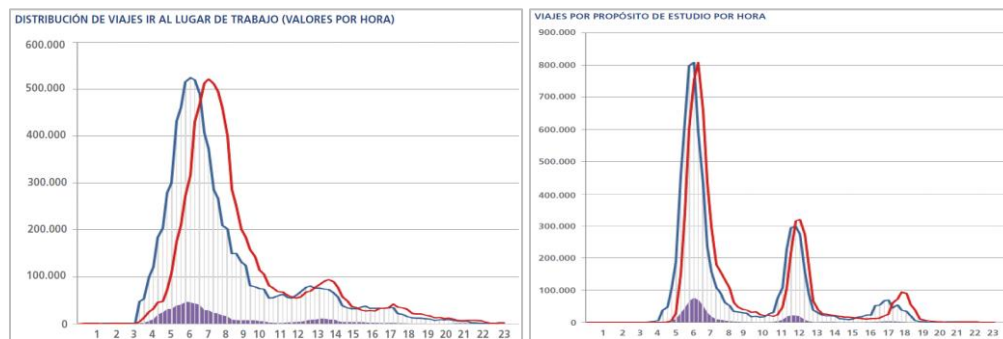
**Tabla 8.** Distribución de usuarios de Transmilenio por ocupación [53].

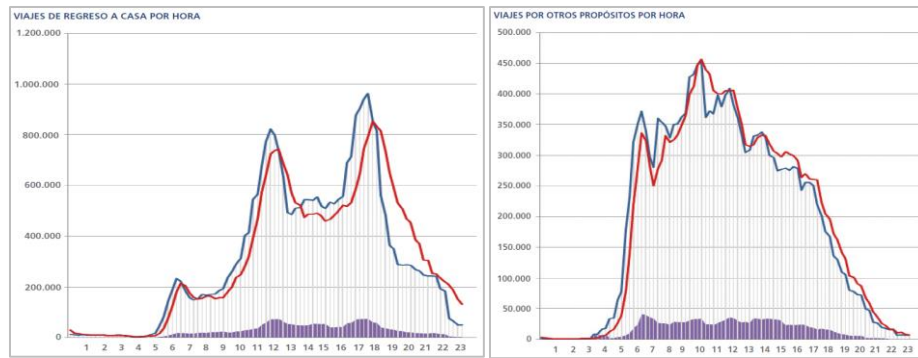
Ocupación	Empleado	Estudia y trabaja	Independiente	Pensionado	Desempleado	Estudiante	Hogar
%	51%	4%	23%	4%	2%	12%	3%

Para encontrar la distribución de usuarios por edad y ocupación se utilizó la técnica de ajuste proporcional iterativo, obteniendo el resultado que se presenta en la Tabla 9.

**Tabla 9.** Distribución de usuarios por edad y ocupación.

Ocupación \ Edad	15 a 19	20 a 24	25 a 29	30 a 34	35 a 44	45 a 54	55 a 64	65 o mas
Empleado	25.0%	0.0%	27.1%	30.0%	11.6%	0.0%	0.8%	5.5%
Independiente	34.7%	2.2%	1.4%	45.0%	12.6%	0.0%	1.5%	2.6%
Estudiante Colegio	68.4%	20.3%	0.0%	4.8%	3.7%	0.0%	2.4%	0.4%
Estudiante Universitario	67.4%	24.2%	0.0%	1.8%	3.6%	0.0%	2.0%	1.0%
Estudia y trabaja	67.8%	28.3%	0.0%	0.0%	0.4%	0.0%	1.3%	2.2%
Pensionado	59.4%	35.0%	0.0%	0.0%	0.5%	0.6%	2.2%	2.3%
Desempleado	42.2%	33.8%	0.0%	0.0%	0.0%	15.8%	3.0%	5.2%
Hogar	34.1%	38.5%	0.0%	0.0%	0.0%	18.0%	2.8%	6.6%

**Figura 15.** Distribución horaria de viajes al trabajo y estudio [54, pp. 61–64].



**Figura 16.** Distribución horaria de viajes de regreso a casa y otros propósitos [54, pp. 61–64].

Respecto a las distribuciones horarias de viajes, los datos encontrados corresponden a viajes en transporte público en general, no son únicamente del sistema Transmilenio, sin embargo, al no encontrar información más específica se optó por utilizar estos valores.

Para determinar la distribución espacial de viajes se utilizó información georreferenciada de los servicios gis de Catastro Bogotá [55] (los servicios están alojados en <http://serviciosgis.catastrobogota.gov.co/arcgis/rest/services/>). Se construyó una herramienta en Python la cual descarga datos en formato Json respecto a la distribución de la población por estrato, ubicación de oficinas, colegios, instituciones de educación superior, entidades administrativas y gubernamentales (CADES, embajadas, registradurías y, notarias), instituciones prestadoras de salud, y sitios de interés (centros comerciales y atracciones turísticas). A cada estación del sistema Transmilenio se le asignó un atributo de proporción de elementos según la cercanía a cada estación. Finalmente, estas proporciones se normalizaron y se tomaron como probabilidades de generación y atracción de viajes para las diferentes actividades que realizan los individuos de la población.

<pre> "name": "Heroes", "ColegioPrivado": 0.028225806, "ColegioPublico": 0.048076923, "EducacionSuperior": 0.022556391, "Oficinas": 0.044523254, "Estrato1": 0.0, "Estrato2": 0.0, "Estrato3": 0.040926383, "Estrato4": 0.011572976, "Estrato5": 0.008206203, "Estrato6": 0.048573239, "CentroComercial_Almacen": 0.026022305, "Cultural_Turismo": 0.02247191, "EdificioPublico": 0.030927835, "Entretenimiento_Recreacion": 0.011363636, "Fabrica_Industria": 0.0, "Salud": 0.037735849 </pre>	<pre> "name": "PortaldelNorte", "ColegioPrivado": 0.066532258, "ColegioPublico": 0.019230769, "EducacionSuperior": 0.015037594, "Oficinas": 0.001488396, "Estrato1": 0.0, "Estrato2": 0.006357274, "Estrato3": 0.022590614, "Estrato4": 0.046586428, "Estrato5": 0.004747789, "Estrato6": 0.0, "CentroComercial_Almacen": 0.040892193, "Cultural_Turismo": 0.011235955, "EdificioPublico": 0.005154639, "Entretenimiento_Recreacion": 0.034090909, "Fabrica_Industria": 0.0, "Salud": 0.0 </pre>
---	--

**Figura 17.** Ejemplo de atributos obtenidos para la generación y atracción de viajes para dos estaciones del sistema simulado.

## VII. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se detalla el proceso de evaluación del sistema propuesto “Smart-BRT” aplicando un protocolo experimental que busca poner a prueba su eficiencia en diferentes tipos de configuraciones y situaciones. A continuación se expone el detalle de dicho protocolo seguido de los resultados obtenidos con su respectivo análisis.

### 1. Protocolo experimental

La evaluación del sistema se hace simulando un tramo del sistema Transmilenio de la ciudad de Bogotá, específicamente la troncal Norte-Caracas, que como se indicó en la metodología, presenta la mayor demanda de viajes. El protocolo experimental propuesto busca evaluar diferentes configuraciones del sistema partiendo desde una configuración estándar de referencia, es decir, como funciona Transmilenio en la actualidad, y configuraciones integrando el sistema Smart-BRT aplicando variaciones en algunos de sus parámetros principales.

El proceso de experimentación tiene dos pasos, en el primero se realiza una simulación del sistema estándar durante dos semanas (sólo días hábiles) y se guarda en una base de datos los registros de las entradas y salidas de los viajes de los pasajeros. A esta base de datos se le aplica el proceso de análisis de patrones de movilidad, el cual será el insumo para las predicciones de destino de viaje en los experimentos que lo requieran. Con el fin de evaluar el desempeño, en cada experimento se medirán las variables definidas en la Tabla 10, como variables independientes se tienen las establecidas en la Tabla 11. La variable ayuda de buses de servicio de ruta fija se puede entender como la solidaridad del bus para prestar ayuda, un valor de 0% corresponde a un bus egoísta que nunca ayuda mientras que un valor de 100% corresponde a un bus que ayuda en toda ocasión siempre y cuando cumpla con las precondiciones establecidas en el protocolo de ayuda.

**Tabla 10.** Variables dependientes.

Variable	Unidad
Tiempo de espera promedio en estación	Minutos
Tiempo promedio de viaje	Minutos
Ocupación promedio a lo largo de la ruta del bus	Pasajeros/por bus
Consumo promedio de combustible	Galones

**Tabla 11.** Variables independientes.

Variable	Valores		
Porcentaje de buses en el sistema. (ver tabla variables intervinientes)	100%		120%
Ayuda de buses de servicio de ruta fija (solidaridad/egoísmo del bus)	0%	50%	100%
Porcentaje de buses de servicio dinámico	0%	15%	30%
Fuente de información de destinos de los pasajeros	Ninguna	Pasajeros	Predicción
Perturbaciones en el sistema	Ninguno		Conflicto en la vía

La variable de fuente de información de destino de los pasajeros tiene tres valores posibles, el valor “ninguna” aplica cuando se está simulando el sistema estándar sin Smart-BRT, por lo cual en esta configuración no se requiere saber el destino de viaje de los pasajeros. El valor “pasajeros” se incorporó debido a que se busca analizar el desempeño del sistema Smart-BRT en el caso ideal donde tiene información perfecta sobre el destino de viaje de las personas. Finalmente, el valor “predicción” se refiere a que el sistema Smart-BRT se encarga de predecir los destinos de viaje aplicando los modelos vistos en los capítulos anteriores. La variable perturbación en el sistema se incluye con el propósito de obtener información de cómo se desenvuelve el sistema en el caso de un conflicto en la vía producto de un accidente o el bloqueo de una intersección debido a una protesta.

Las variables intervinientes se presentan en la Tabla 12. Aquí es importante aclarar los valores definidos para el tamaño de la población y el número de buses. Según Global BRT data [2] la demanda diaria de pasajeros en los corredores Caracas y Norte es de 520,880 y 335,700 respectivamente, es decir, un total de 856,580. Sin embargo, por limitaciones de software se fijó en un valor de 500.000 pasajeros. Para el caso de los buses, la troncal Caracas tiene una capacidad máxima de 48,000 pasajeros por hora por dirección en la hora pico, cada bus tienen una capacidad de 160 pasajeros por lo cual al realizar la división se tienen 300 buses por hora por dirección, es decir, 600 buses por hora. Pese a que previamente se redujo la demanda de pasajeros también es justo reducir el número de buses, además de que a cada bus se le asigna un agente de software es conveniente no tener un número de buses muy elevado, por lo cual se fijó en 400.

**Tabla 12.** Variables intervinientes.

Variable	Valor
Troncal del sistema	Se determina sólo simular la troncal Norte-Caracas debido a que es el corredor de mayor demanda. Comprende desde la estación Terminal en el norte de la ciudad hasta la estación de Tercer milenio en el centro de Bogotá.
Número de buses	Se toma 400 como valor nominal de buses. Por lo cual el 100% de buses equivale a un total de 400 buses y el 120% a 480 buses.
Número de individuos de la población	Se fija en un valor de 500,000 individuos para todos los experimentos.
Días de simulación	Por cuestiones de recursos computacionales y cantidad de experimentos sólo se simularán 3 días hábiles (lunes, martes y miércoles). Se seleccionan únicamente días hábiles debido a que en estos se presenta la mayor demanda de viajes.
Ubicación y duración del conflicto en la vía	Calle 72 por una duración de una hora empezando a las 7:00 am.
Rutas de buses	Se emplearon las rutas del sistema Transmilenio que circulan en la troncal Norte-Caracas.

**Tabla 13.** Distribución de buses en servicios de ruta fija (SRF) y servicios dinámicos (SD)

Porcentaje de buses de servicio dinámico	Buses en el sistema			
	100 %		120 %	
	SRF	SD	SRF	SD
0 %	400	0	480	0
15 %	340	60	408	72
30 %	280	120	336	144



De las diferentes combinaciones de las variables independientes se seleccionaron aquellas más relevantes llegando a un total de 52 configuraciones. Cada experimento se realiza 3 veces por lo cual se obtiene un total de 156 ejecuciones. Un día de simulación tarda en promedio 25 minutos, entonces, se requieren en total 65 horas de cómputo. Gracias a la colaboración de la universidad, se pudo emplear un laboratorio de la facultad de ingeniería de sistemas donde se usaron 13 computadores Lenovo Intel Core i5 (2.40GHz) con 8 Gb de memoria RAM y sistema operativo Windows, lo cual permitió realizar los experimentos en aproximadamente 6 horas.

## 2. Análisis de resultados

La Tabla 14 presenta las diferentes configuraciones de los sistemas empleados en la experimentación junto con el código que lo identifica en las figuras y tablas posteriores. Las configuraciones “E000-D00” y “E000-D00-B1.2” corresponden al sistema estándar de referencia, la diferencia entre estos es que en el segundo se hace un incremento de 1.2 veces los buses del sistema normal.

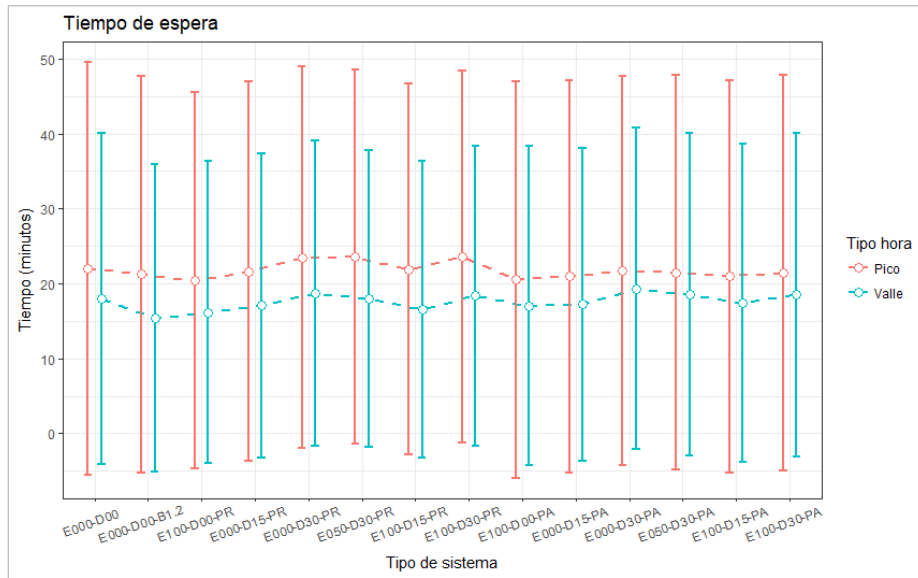
**Tabla 14.** Configuraciones de sistemas de los experimentos

Código	Ayuda de buses de ruta fija	% Buses dinámicos	Fuente información destino
E000-D00	0%	0%	-
E000-D00-B1.2	0%	0%	-
E100-D00-PR	100%	0%	Predicción
E000-D15-PR	0%	15%	Predicción
E100-D15-PR	100%	15%	Predicción
E000-D30-PR	0%	30%	Predicción
E050-D30-PR	50%	30%	Predicción
E100-D30-PR	100%	30%	Predicción
E100-D00-PA	100%	0%	Pasajero
E000-D15-PA	0%	15%	Pasajero
E100-D15-PA	100%	15%	Pasajero
E000-D30-PA	0%	30%	Pasajero
E050-D30-PA	50%	30%	Pasajero
E100-D30-PA	100%	30%	Pasajero

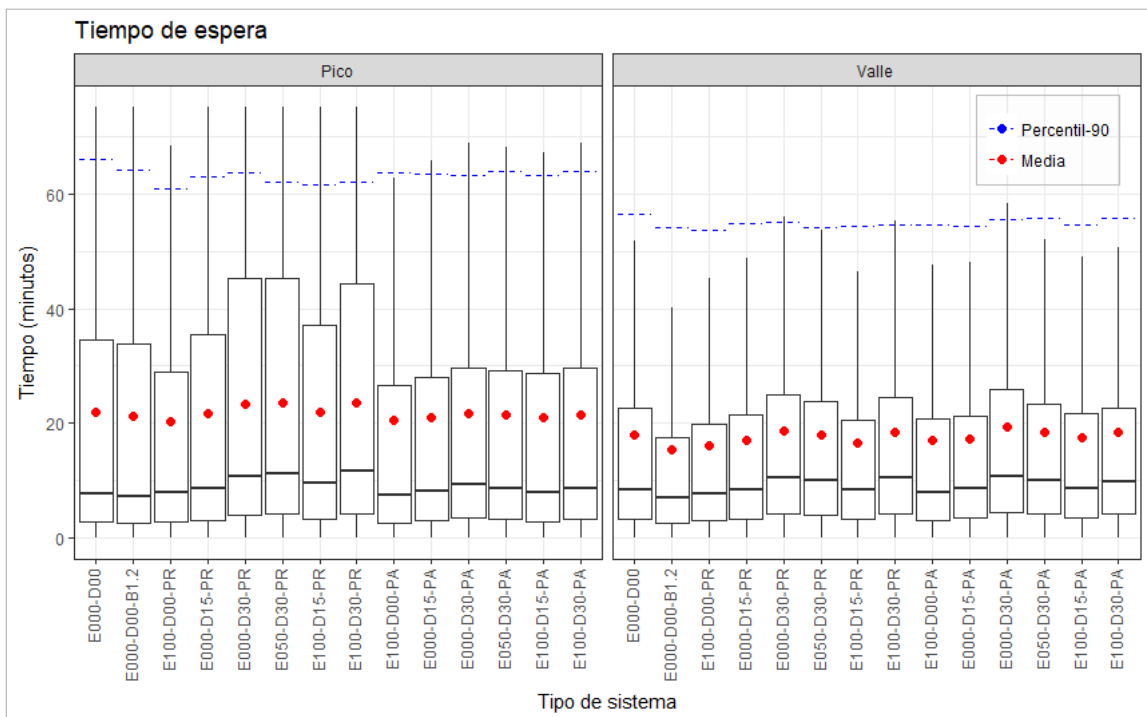
### 2.1. Tiempo de espera

Realizando un primer análisis del promedio y la varianza por tipo de sistema y tipo de hora como se muestra en la Figura 18 se puede observar que en el caso de uso de predicción se tiene en general un incremento del tiempo de espera, mientras que en el caso de información completa suministrada por el pasajero se alcanza a tener una ligera disminución. Sin embargo, es de notar la gran variación de los datos, por lo cual es conveniente realizar un análisis estadístico más profundo. En primer lugar se aplica el test de Shapiro–Wilk para determinar la normalidad de los datos. Aquí se plantea como hipótesis nula  $H_0$ : que la muestra de datos se distribuye de manera normal. El test arroja un p-valor  $< 2.2e-16$ , lo cual rechaza la hipótesis nula indicando

que los datos no se distribuyen de manera normal, esto sugiere realizar un análisis empleando la mediana como medida de tendencia central, obteniendo el resultado de la Figura 19.

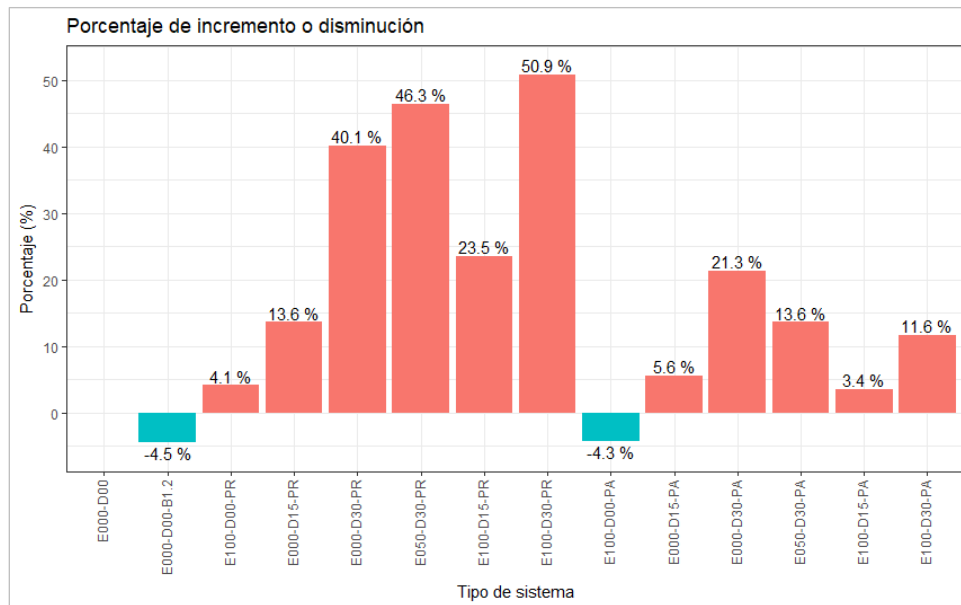


**Figura 18.** Promedio y desviación estándar del tiempo de espera por tipo de sistema y tipo de hora.



**Figura 19.** Diagrama de cajas del tiempo de espera por tipo de sistema y tipo de hora.

Para facilitar el análisis nos centraremos en la hora pico. En la Figura 20 podemos observar el porcentaje de incremento y/o disminución del tiempo de espera con respecto al sistema de referencia “E000-D00”. En general para todos los sistemas que integran Smart-BRT se puede observar un incremento en la mediana del tiempo de espera a excepción del sistema “E100-D00-PA” donde se tuvo una reducción casi equivalente al sistema estándar con 20% más de buses. Los sistemas que usan predicción generan incrementos mayores que aquellos que obtienen información completa del pasajero, quizá esto se deba al porcentaje de error en la predicción ocasionando que los buses atiendan pares origen-destino que realmente no tienen una demanda significativa.



**Figura 20.** Porcentaje de incremento o disminución del tiempo de espera por tipo de sistema para la hora pico con respecto al sistema de referencia E000-D00.

Adicional a los porcentajes anteriores, se aplicó una prueba estadística para brindar un soporte más riguroso a los resultados anteriores. Dado que la muestra no sigue una distribución normal es necesario aplicar una prueba no paramétrica, por lo cual se empleó la prueba de los rangos con signo de Wilcoxon. Se plantea como hipótesis nula  $H_0 : Me_1 \leq Me_2$ , es decir, que la mediana del sistema de referencia es menor o igual a la mediana del sistema contra el cual se compara. Se toma una significancia de  $\alpha = 0.05$ .

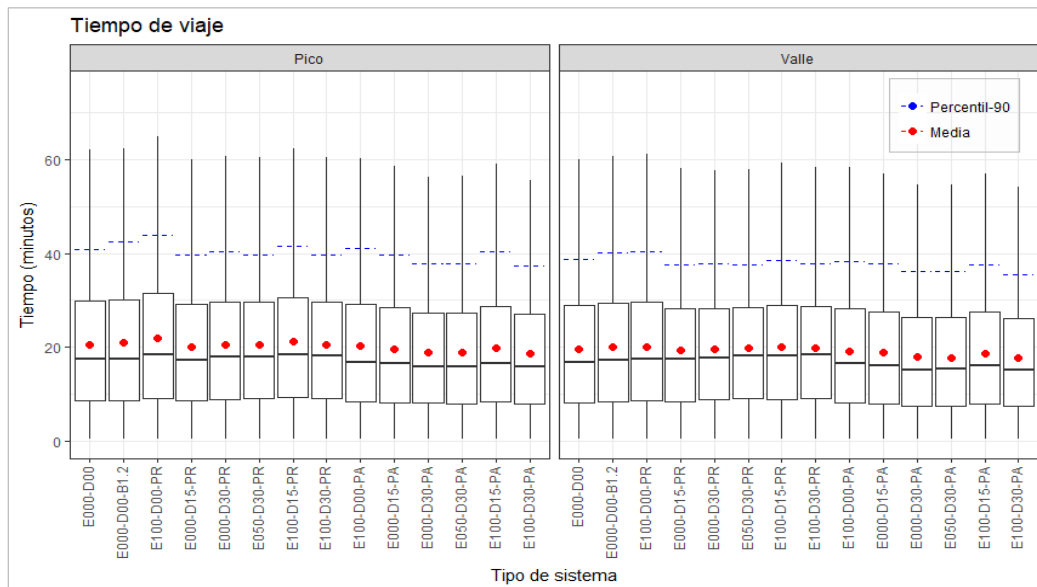
La Tabla 15 presenta un resumen estadístico de los datos y el resultado del test, dónde se obtuvo que para 5 sistemas existe evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula y aceptar la hipótesis alternativa, es decir, que estos sistemas proporcionan una reducción en el tiempo de espera. El sistema “E000-D00-B1.2” sirve más como una referencia para comparar el desempeño de los demás.

**Tabla 15.** Resumen estadístico y resultados del test para tiempo de espera

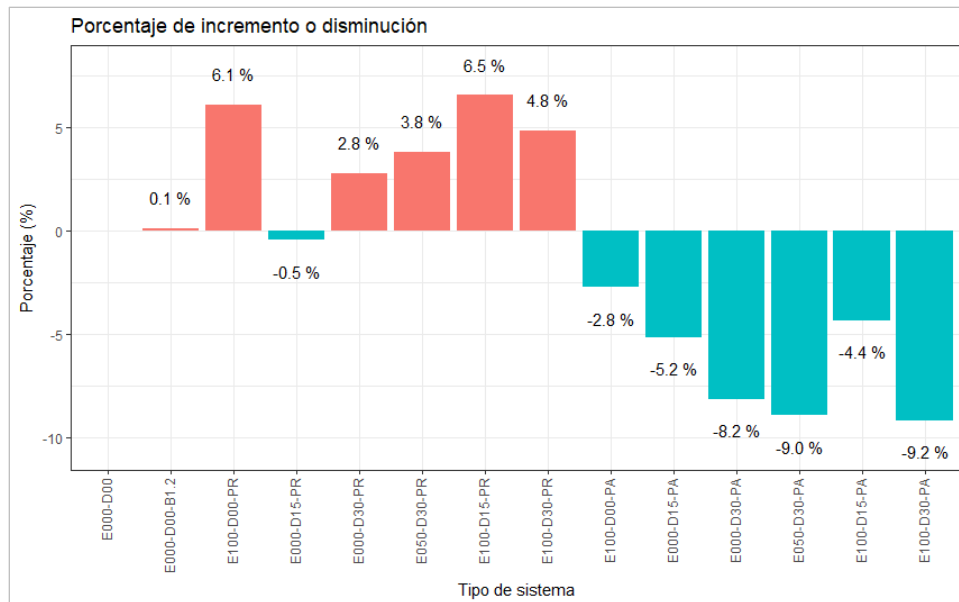
Tipo sistema	IQR	Mediana	Media	% Incr-Redu	P-value	Test
E000-D00	31.78	7.73	21.99	0.00%		
E000-D00-B1.2	31.18	7.38	21.22	-4.53%	2.40E-26	Rechaza H0
E100-D00-PR	26.17	8.05	20.43	4.09%	4.85E-35	Rechaza H0
E000-D15-PR	32.30	8.78	21.64	13.58%	1.00E+00	
E000-D30-PR	41.32	10.83	23.45	40.09%	1.00E+00	
E050-D30-PR	41.15	11.32	23.56	46.34%	1.00E+00	
E100-D15-PR	33.63	9.55	21.90	23.49%	1.00E+00	
E100-D30-PR	40.03	11.67	23.57	50.86%	1.00E+00	
E100-D00-PA	24.05	7.40	20.50	-4.31%	6.02E-78	Rechaza H0
E000-D15-PA	25.12	8.17	20.97	5.60%	1.65E-09	Rechaza H0
E000-D30-PA	26.13	9.38	21.72	21.34%	1.00E+00	
E050-D30-PA	25.88	8.78	21.48	13.58%	1.00E+00	
E100-D15-PA	25.72	8.00	20.93	3.45%	6.11E-15	Rechaza H0
E100-D30-PA	26.17	8.63	21.47	11.64%	1.00E+00	

## 2.2. Tiempo de viaje

Realizando el mismo procedimiento, esta vez para el tiempo de viaje se obtienen los siguientes resultados.



**Figura 21.** Diagrama de cajas del tiempo de viaje por tipo de sistema y tipo de hora.



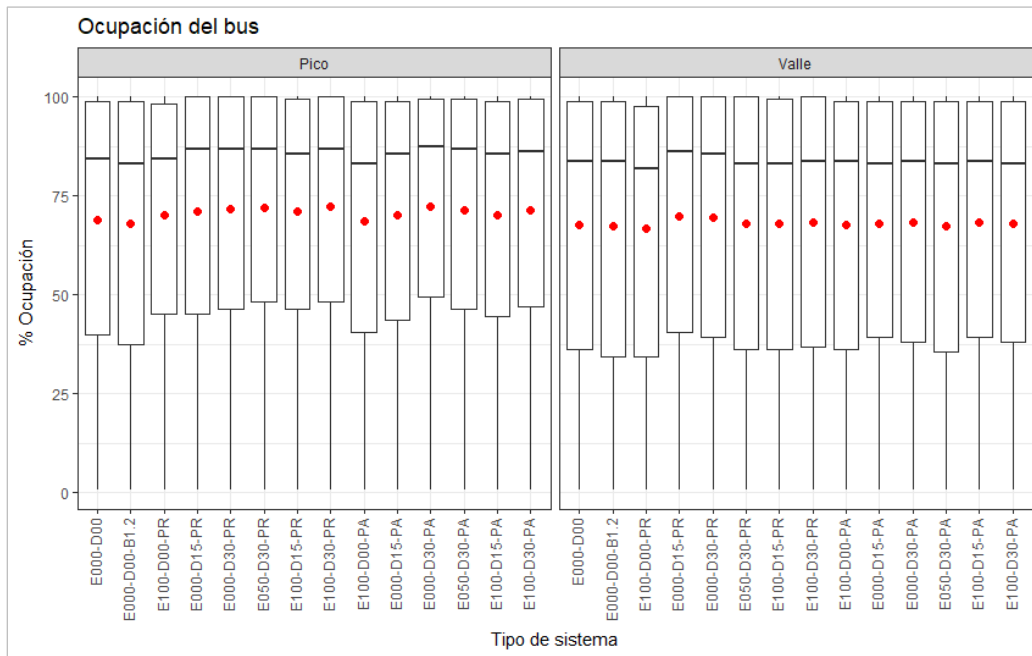
**Figura 22.** Porcentaje de incremento o disminución del tiempo de viaje por tipo de sistema para la hora pico con respecto al sistema de referencia E000-D00.

En este caso podemos observar que en si el tiempo de viaje tiene un comportamiento más homogéneo, sin embargo, se obtienen unas leves mejoras en el tiempo de viaje en los sistemas que tienen información completa del destino provista por el pasajero.

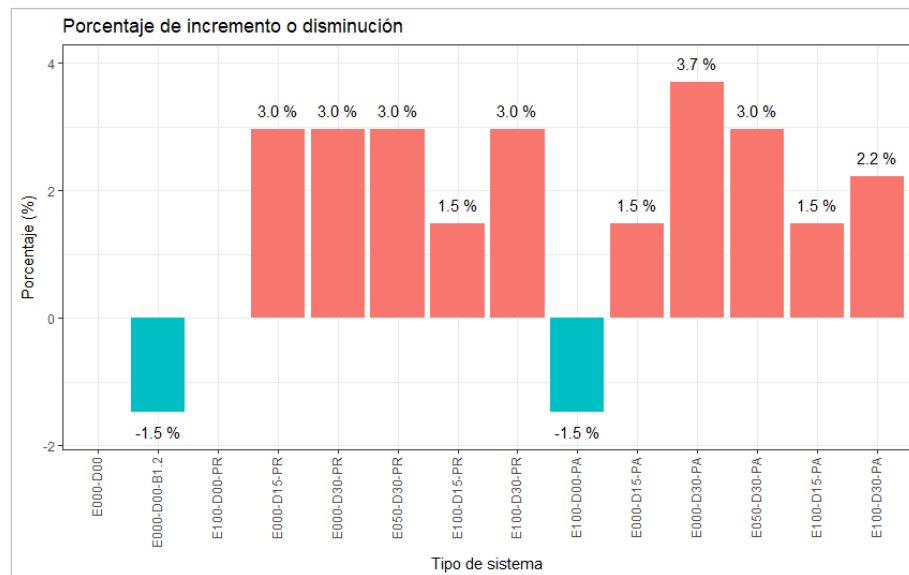
**Tabla 16.** Resumen estadístico y resultados del test para tiempo de viaje

Tipo sistema	IQR	Mediana	Media	% Incr-Redu	P-value	Test
E000-D00	21.3	17.42	20.50145	0.00%		
E000-D00-B1.2	21.38	17.44	21.01515	0.11%	1.00E+00	
E100-D00-PR	22.28	18.48	21.83838	6.08%	1.00E+00	
E000-D15-PR	20.56	17.34	20.09075	-0.46%	8.45E-19	Rechaza H0
E000-D30-PR	20.72	17.9	20.4496	2.76%	8.20E-01	
E050-D30-PR	20.56	18.08	20.51385	3.79%	1.00E+00	
E100-D15-PR	21.12	18.56	21.22807	6.54%	1.00E+00	
E100-D30-PR	20.54	18.26	20.5915	4.82%	1.00E+00	
E100-D00-PA	20.66	16.94	20.25233	-2.76%	2.81E-15	Rechaza H0
E000-D15-PA	20.1	16.52	19.65463	-5.17%	6.96E-99	Rechaza H0
E000-D30-PA	19.2	16	18.83967	-8.15%	0.00E+00	Rechaza H0
E050-D30-PA	19.4	15.86	18.83565	-8.96%	0.00E+00	Rechaza H0
E100-D15-PA	20.24	16.66	19.84048	-4.36%	9.04E-61	Rechaza H0
E100-D30-PA	19.06	15.82	18.62691	-9.18%	0.00E+00	Rechaza H0

### 2.3. Ocupación del bus



**Figura 23.** Diagrama de cajas del porcentaje de ocupación del bus por tipo de sistema y tipo de hora.

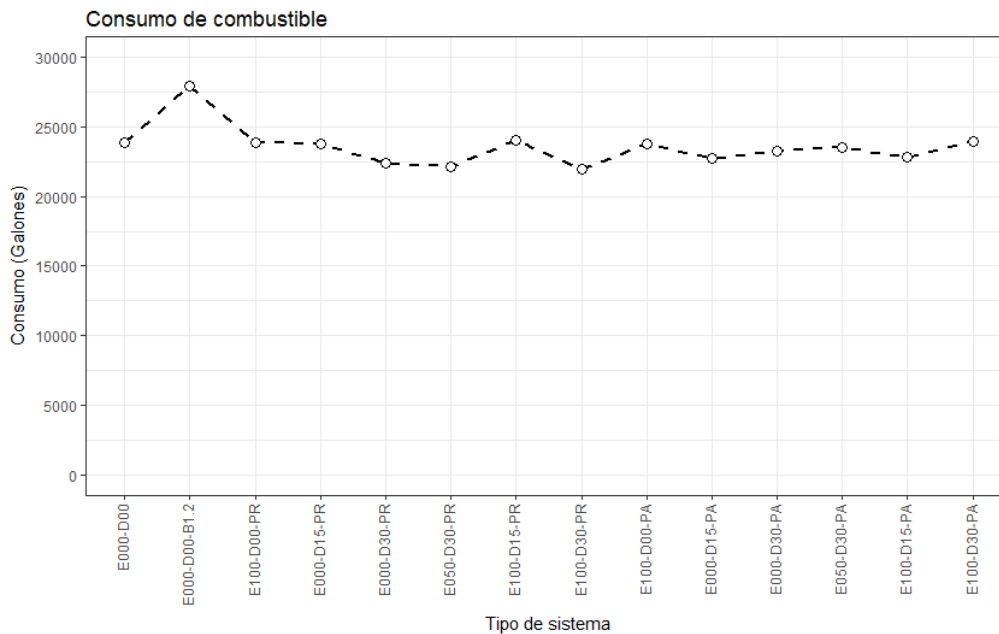


**Figura 24.** Porcentaje de incremento o disminución de la ocupación del bus por tipo de sistema para la hora pico con respecto al sistema de referencia E000-D00.

Respecto a la ocupación del bus podemos decir que la mediana en general oscila alrededor del 84%, y el cuartil 3 está casi en el 100% lo cual indica que un 25% de los pasajeros experimenta un nivel de ocupación del bus de más del 84% lo cual usualmente genera bajo confort. Desde el punto de vista de la agencia de transporte, esto puede verse como un punto positivo pues se busca aprovechar un número limitado de buses para transportar el mayor número de pasajeros posible. En cuanto a los sistemas con Smart-BRT se observa que en general incrementa la ocupación del bus con el propósito de aprovechar el recurso de transporte lo cual puede ser bueno para la agencia de transporte pero posiblemente cause malestar en los pasajeros al reducir el confort.

## 2.4. Consumo de combustible

La Figura 25 muestra el consumo total de combustible de la flota de buses para cada tipo de sistema. Se puede decir que en general no hay diferencia significativa pues las variaciones pueden ser por situaciones aleatorias de la simulación. En el caso que evidencia un pico es cuando se aumentan los buses en un 20% para el caso del sistema de referencia lo cual es predecible.



**Figura 25.** Consumo total de combustible por la flota de buses por tipo de sistema

### 2.5. Conflicto vehicular

La Figura 26 muestra la densidad de abordajes a lo largo del día en el caso particular del escenario donde se presenta un conflicto u obstrucción en la vía. El intervalo de tiempo entre el cual sucede el evento se puede detallar entre las líneas roja y azul el cual equivale a una hora. Es de considerar la drástica disminución en los abordajes que se presenta en ese intervalo de tiempo y el impacto que tiene en la movilidad, por lo cual después de finalizar la situación se evidencia un pico de abordajes debido a la demanda de pasajeros represada.

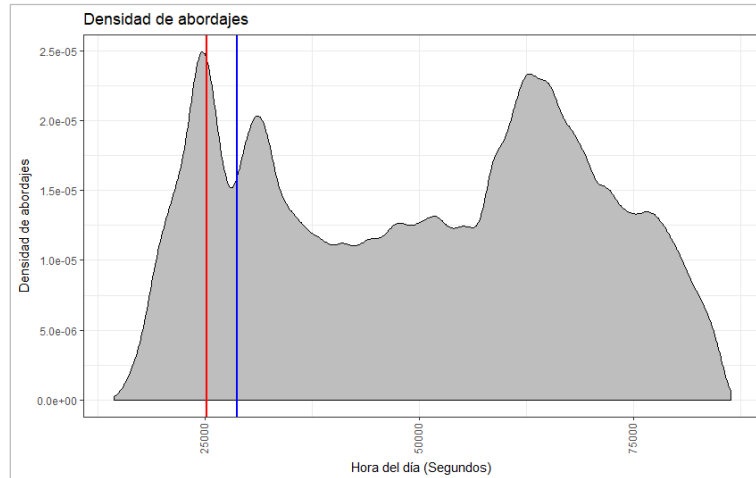


Figura 26. Densidad de abordajes a lo largo del día.

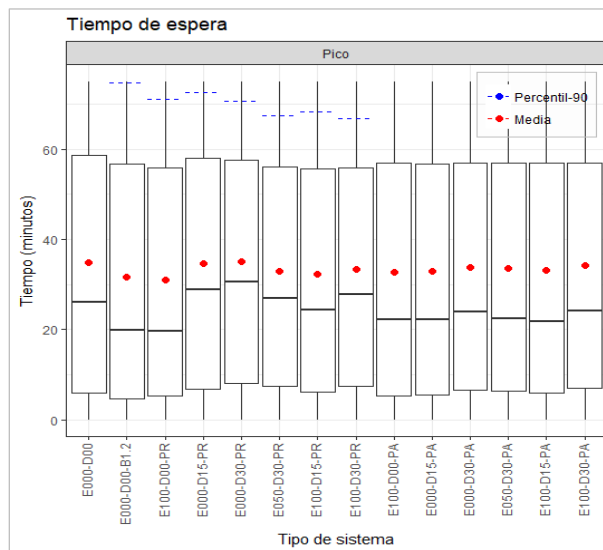
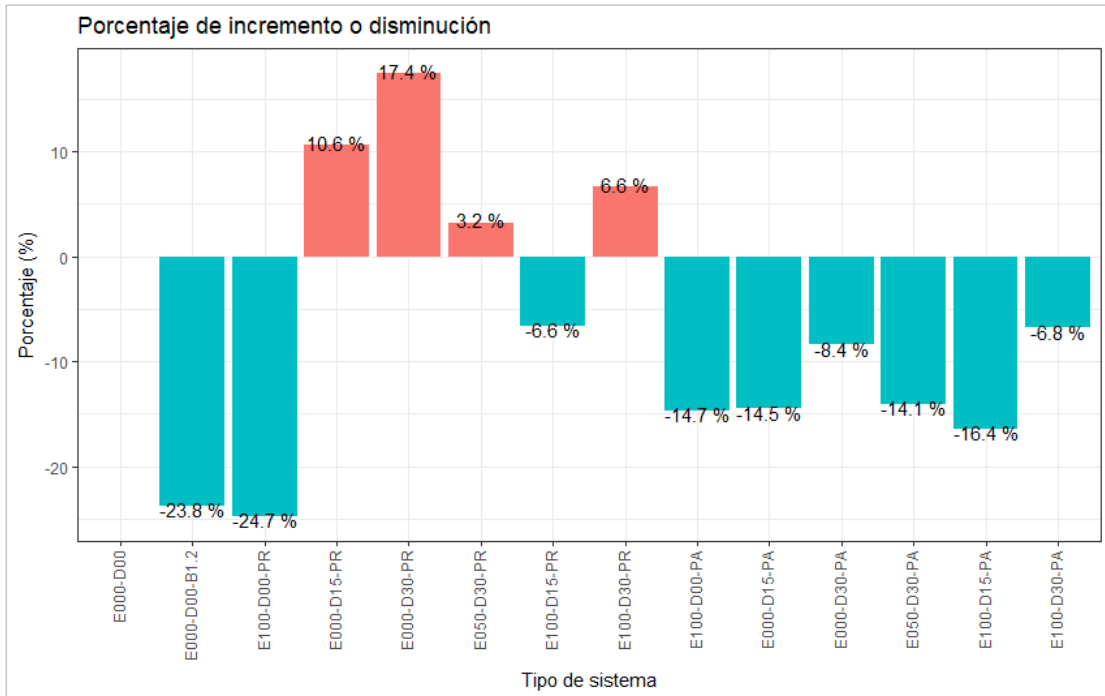


Figura 27. Diagrama de cajas del tiempo de espera para el intervalo del conflicto vehicular



Para el escenario del conflicto vehicular podemos observar en la Figura 28 que los sistemas que mejor atacan el problema con mayor reducción de los tiempos de espera de los pasajeros son el sistema de referencia con los buses adicionales y el sistema con máxima ayuda por parte de los buses con servicio de ruta fija sin servicios dinámicos y con predicción. Por otro lado, los sistemas con información completa tienen buenos índices de reducción del tiempo de espera lo cual respalda la idea de que con mejor información de las necesidades de movilidad de los usuarios se pueden aprovechar mejor los recursos y destinarlos a los puntos de demanda crítica.



**Figura 28.** Porcentajes de incremento y disminución del tiempo de espera para el intervalo del conflicto por tipo de sistema con respecto al sistema de referencia E000-D00

## VIII. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

El sistema Smart-BRT ofrece una serie de estrategias novedosas con gran potencial de mejorar diferentes aspectos del desempeño operativo de un sistema BRT. Se pueden tener beneficios operativos similares a los obtenidos al incrementar el número de buses un 20% en el sistema de referencia. Por otro lado, en cuanto a la ocupación de los buses, se puede decir que el sistema fomenta la distribución homogénea de la carga de pasajeros entre los buses, maximizando su ocupación, lo cual, desde el punto de vista de la agencia de transporte es positivo pero desde el punto de vista del pasajero es negativo dado que se afecta el confort del viaje.

En base a los resultados obtenidos en la experimentación, podemos concluir que a medida que se incrementa la proporción de buses 100% dinámicos se afecta negativamente los tiempos de espera provocando que estos aumenten. En los servicios de ruta fija sucede totalmente lo opuesto, es decir, se obtienen menores tiempos de espera a medida que se incrementa la solidaridad en este tipo de servicios. En cuanto al tiempo de viaje, se obtienen mayores beneficios a medida que se incrementa el porcentaje de buses 100% dinámicos. Respecto a la ocupación del bus, se obtuvieron mejores resultados en la configuración con máxima ayuda de servicios de ruta fija sin servicios 100% dinámicos. Finalmente, podemos decir que la operación del sistema Smart-BRT no genera incrementos en el consumo de combustible siendo una gran contribución para reducir costos a la agencia de transporte logrando incrementar su eficiencia operativa, en algunos casos, de manera similar a un incremento del 20% de buses, lo cual si implicaría un incremento importante en los costos operacionales del sistema.

Los servicios de ruta completamente dinámica tienen un gran potencial para reducir los tiempos de viaje, pues siguiendo la filosofía de los servicios expresos, conectan pares origen-destino de alta demanda. Lo importante a recalcar es que dichos servicios no deben ser preestablecidos por la agencia de transporte sino que por lo contrario surgen de manera emergente dadas las necesidades de movilidad de los pasajeros y el estado del sistema. No obstante, la operación únicamente con este tipo de servicios puede generar un gran impacto negativo en la usabilidad del sistema por lo cual aún se requiere más investigación y adicional mente propuestas y estrategias efectivas para transmitir la información de los cambios del sistema a los pasajeros.

De acuerdo a la experimentación, la efectividad del sistema está fuertemente ligada a la calidad de la información de viaje de las personas. En los casos donde el sistema predecía el destino de viaje de los pasajeros se tuvo un bajo desempeño debido a la baja precisión del mecanismo de predicción. Gran parte del error es debido a que un porcentaje de los viajes de la ciudad posee una tendencia más estocástica que no sigue un patrón o tendencia, razón por la cual el mecanismo difícilmente puede mejorar la calidad de sus predicciones. Por otro lado, en los casos donde el sistema obtenía información completa por parte del pasajero se evidenciaron mejoras considerables en los tiempos de espera y tiempos de viaje. De aquí podemos remarcar la necesidad de seguir explorando técnicas de inteligencia artificial que permitan mejorar la precisión de las predicciones del sistema. Por ejemplo, se podrían revisar e incorporar heurísticas o también emplear dos o más técnicas donde unas se dediquen a los viajes que siguen patrones fuertes y otra para patrones débiles y/o viajes estocásticos.

Si bien durante la simulación y los experimentos se estableció un porcentaje fijo de buses de servicio 100% dinámico para todo el día, se considera como una opción alterna, que potencialmente brinde mejores resultados, incorporar variaciones del porcentaje de buses a lo largo del día. Incluso el sistema puede emplear un mecanismo de aprendizaje que le permita determinar en qué situaciones debe realizar las variaciones pertinentes.

Este trabajo propone una arquitectura basada en agentes que puede ser fácilmente extensible para lograr un sistema de control autónomo holístico, pues es posible agregar nuevos mecanismos deliberativos en los agentes para afrontar otro tipo de problemáticas. De igual manera, está alineado con las recientes investigaciones en vehículos autónomos en donde se puede profundizar y encaminar nuevos proyectos.

Dos contribuciones importantes de este trabajo son el modelo de generación de datos sintéticos y el simulador de sistemas BRT, los cuales son herramientas que pueden ser implementadas o servir de inspiración para otros proyectos de investigación en transporte.

En cuanto a la simulación, aún es necesario trabajar y reforzar diferentes modelos para obtener una mayor fidelidad en la representación del mundo real. Por ejemplo, los modelos empleados para el comportamiento y toma de decisiones de viaje de las personas son básicos y solo incluyen días hábiles. Sería interesante poder incorporar aspectos de la cultura ciudadana en la simulación, pues el comportamiento de las personas tiene un gran impacto en los tiempos de parada de los buses generando efectos secundarios en la operación del sistema.

Un elemento con alto potencial de contribuir en la mejora de la operación del sistema es la información contextual. Si bien, la propuesta de nuestro sistema no la incluye es importante nombrarla con el fin de que en proyectos futuros sea tenida en cuenta. La incorporación de información contextual básicamente consiste en proveer al sistema de información de eventos o situaciones dentro de la ciudad que son conocidos y planeados con antelación y que tienen un impacto fuerte en la movilidad. Ejemplos de estos eventos son los conciertos musicales, los partidos de fútbol, las temporadas navideñas y de fin de año, la ampliación del horario de comercio en determinadas temporadas, la salida de vacaciones de los estudiantes, la semana santa, protestas o marchas, entre otros. El propósito es brindarle esa información al sistema, con el detalle del lapso de tiempo dentro del cual sucede el evento, un estimado de matrices origen-destino y niveles de demanda que se presentaran antes, durante o después del evento, junto con los recursos viales y vehiculares de los cuales dispone el sistema para operar. Para enriquecer el modelo, se requeriría de un elemento que transforme dicha información en probabilidades de viajes para ser contabilizados dentro de las medidas de evaluación de la calidad de servicio del sistema y así poder abordar la demanda de pasajeros de una manera más eficiente.

Adicionalmente, como trabajo futuro, se contempla la generación de un protocolo experimental de mayor rigor donde se contemplen variaciones de todos los parámetros de configuración del sistema de tal forma que se puedan encontrar aquellos valores que brinden mayor eficiencia en la operación.

## REFERENCIAS

- [1] W. Hook and L. Wright, *Bus Rapid Transit Planning Guide*, 3rd ed., no. June. Institute for Transportation & Development Policy, 2007.
- [2] BRT Centre of Excellence, EMBARQ, IEA, and SIBRT, “Global BRTData,” 2016. [Online]. Available: <http://www.brtdata.org>. [Accessed: 04-Aug-2016].
- [3] D. Hidalgo, L. Pereira, N. Estupiñán, and P. L. Jiménez, “TransMilenio BRT system in Bogota, high performance and positive impact – Main results of an ex-post evaluation,” *Res. Transp. Econ.*, vol. 39, no. 1, pp. 133–138, Mar. 2013.
- [4] Cámara de comercio de Bogotá, “Resultados encuesta de percepción sobre las condiciones, calidad y servicio a los usuarios del transmilenio, SITP y TPC,” 2014.
- [5] Cámara de comercio de Bogotá, “¿Como mejorar la movilidad de los bogotanos? 2016 - 2020,” 2015.
- [6] F. Peña, A. Jimenez, and A. Mateos, “A First Approach to the Optimization of Bogota’s TransMilenio BRT System,” 2013.
- [7] Y. Zhu, “Study on Intelligent Traffic Control Based BRT,” in *2010 2nd International Workshop on Intelligent Systems and Applications*, 2010, pp. 1–4.
- [8] X. Dong, G. Xiong, D. Fan, F. Zhu, and Y. Lv, “Research on bus rapid transit (BRT) and its real-time scheduling,” in *Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Service Operations, Logistics and Informatics*, 2011, pp. 342–346.
- [9] N. Wang, Y. Chen, and L. Zhang, “Design of Multi-agent-based Distributed Scheduling System for Bus Rapid Transit,” in *2011 Third International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics*, 2011, vol. 2, pp. 111–114.
- [10] L. Serrano, “Control de tráfico con SOTL-UPC,” Pontificia Universidad Javeriana, 2014.
- [11] S. A. Rojas-Galeano, “Some thoughts on adaptive stop tables for TransMilenio services,” in *2015 Workshop on Engineering Applications - International Congress on Engineering (WEA)*, 2015, pp. 1–4.
- [12] R. Trasarti *et al.*, “Discovering urban and country dynamics from mobile phone data with spatial correlation patterns,” *Telecomm. Policy*, vol. 39, no. 3–4, pp. 347–362, May 2015.

- [13] C. Kang *et al.*, “Analyzing and geo-visualizing individual human mobility patterns using mobile call records,” in *2010 18th International Conference on Geoinformatics*, 2010, pp. 1–7.
- [14] Z. Hu, X. Deng, H. Wen, J. Guo, and C. Wang, “Cellular Phone Data Analysis in Comprehensive Transportation Survey: A Case Study in Beijing,” in *7th Advanced Forum on Transportation of China (AFTC 2011)*, 2011, pp. 176–180.
- [15] Yu Xiao *et al.*, “Transportation activity analysis using smartphones,” in *2012 IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC)*, 2012, pp. 60–61.
- [16] F. Pfaender and J. Fen-Chong, “Exploratory analysis of urban mobility: from mobile phone usage data to tourist behaviour,” in *IET International Conference on Smart and Sustainable City (ICSSC 2011)*, 2011, pp. 15–15.
- [17] P. Widhalm, Y. Yang, M. Ulm, S. Athavale, and M. C. González, “Discovering urban activity patterns in cell phone data,” *Transportation (Amst.)*, vol. 42, no. 4, pp. 597–623, Jul. 2015.
- [18] G. Di Lorenzo, M. Sbodio, F. Calabrese, M. Berlingerio, F. Pinelli, and R. Nair, “AllAboard: Visual Exploration of Cellphone Mobility Data to Optimise Public Transport,” *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.*, vol. 22, no. 2, pp. 1036–1050, Feb. 2016.
- [19] F. Calabrese, G. Di Lorenzo, L. Liu, and C. Ratti, “Estimating Origin-Destination Flows Using Mobile Phone Location Data,” *IEEE Pervasive Comput.*, vol. 10, no. 4, pp. 36–44, Apr. 2011.
- [20] X. Luo, X. Zhao, L. Sun, K. Ma, and J. Tang, “Dynamic bus dispatching under the environment of Internet of things,” in *Proceeding of the 11th World Congress on Intelligent Control and Automation*, 2014, pp. 449–454.
- [21] F. Milla, D. Saez, C. E. Cortes, and A. Cipriano, “Bus-Stop Control Strategies Based on Fuzzy Rules for the Operation of a Public Transport System,” *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 13, no. 3, pp. 1394–1403, Sep. 2012.
- [22] X. Zuo, C. Chen, W. Tan, and M. Zhou, “Vehicle Scheduling of an Urban Bus Line via an Improved Multiobjective Genetic Algorithm,” *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 16, no. 2, pp. 1–12, 2014.
- [23] K. Ampountolas and M. Kring, “Mitigating Bunching with Bus-following Models and Bus-to-Bus Cooperation,” in *2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems*, 2015, vol. 2015–Octob, pp. 60–65.
- [24] J. Rodríguez, M. Torres, and E. González, “The AOPOA Methodology,” 2007.
- [25] A. Ceder, *Public Transit Planning and Operation: Theory, Modelling and Practice*, 1st ed. Elsevier, 2007.

- [26] J. de D. Ortúzar, *Modelos de demanda de transporte*, 2nd ed. Mexico: Alfaomega, 2000.
- [27] J. de D. Ortúzar and L. G. Willumsen, *Modelling Transport*, 4th ed. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2011.
- [28] D. Boyle, J. Pappas, P. Boyle, B. Nelson, D. Sharfarz, and H. Benn, *Controlling System Costs: Basic and Advanced Scheduling Manuals and Contemporary Issues in Transit Scheduling*. Washington D.C.: Transportation Research Board, 2009.
- [29] Kittelson & Associates et al., *Transit Capacity and Quality of Service Manual*, 3rd ed. Washington D.C.: Transportation Research Board, 2013.
- [30] W. Zhang, Zhongke-Shi, and Q. Liu, "Research on the Prediction of Urban Passenger Transport based on Support Vector Machine," in *2007 IEEE International Conference on Automation and Logistics*, 2007, pp. 862–865.
- [31] D. Tan, J. Wang, H. Liu, and X. Wang, "The optimization of bus scheduling based on genetic algorithm," in *Proceedings 2011 International Conference on Transportation, Mechanical, and Electrical Engineering (TMEE)*, 2011, pp. 1530–1533.
- [32] Ming Wei, Wenzhou Jin, W. Fu, and X. Hao, "Improved ant colony algorithm for multi-depot bus scheduling problem with route time constraints," in *2010 8th World Congress on Intelligent Control and Automation*, 2010, pp. 4050–4053.
- [33] Lingmei Huo, Guifeng Yan, Bowen Fan, Hongzhou Wang, and Weitao Gao, "School bus routing problem based on ant colony optimization algorithm," in *2014 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*, 2014, pp. 1–5.
- [34] F. Calabrese, M. Colonna, P. Lovisolo, D. Parata, and C. Ratti, "Real-Time Urban Monitoring Using Cell Phones: A Case Study in Rome," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 12, no. 1, pp. 141–151, Mar. 2011.
- [35] F. Calabrese, M. Diao, G. Di Lorenzo, J. Ferreira, and C. Ratti, "Understanding individual mobility patterns from urban sensing data: A mobile phone trace example.," *Transp. Res. Part C*, vol. 26, pp. 301–313, 2013.
- [36] S. Foell, S. Phithakkitnukoon, G. Kortuem, M. Veloso, and C. Bento, "Catch me if you can: Predicting mobility patterns of public transport users," in *17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 2014, pp. 1995–2002.
- [37] L. Atzori, A. Iera, and G. Morabito, "The Internet of Things: A survey," *Comput. Networks*, vol. 54, no. 15, pp. 2787–2805, Oct. 2010.
- [38] J. Gubbi, R. Buyya, S. Marusic, and M. Palaniswami, "Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions," *Futur. Gener. Comput. Syst.*, vol. 29, no. 7, pp. 1645–1660, 2013.

- [39] Z. Yang, B. Yu, and C. Cheng, "A Parallel Ant Colony Algorithm for Bus Network Optimization," *Comput. Civ. Infrastruct. Eng.*, vol. 22, no. 1, pp. 44–55, Jan. 2007.
- [40] C. Leiva, J. C. Muñoz, R. Giesen, and H. Larrain, "Design of limited-stop services for an urban bus corridor with capacity constraints," *Transp. Res. Part B Methodol.*, vol. 44, no. 10, pp. 1186–1201, Dec. 2010.
- [41] X. Chen, B. Hellinga, C. Chang, and L. Fu, "Optimization of headways with stop-skipping control: a case study of bus rapid transit system," *J. Adv. Transp.*, vol. 49, no. 3, pp. 385–401, Apr. 2015.
- [42] G. E. Sánchez-Martínez, N. H. M. Wilson, and H. N. Koutsopoulos, "Schedule-free high-frequency transit operations," *Public Transp.*, pp. 1–21, 2016.
- [43] A. Tirachini, D. A. Hensher, and J. M. Rose, "Crowding in public transport systems: Effects on users, operation and implications for the estimation of demand," *Transp. Res. Part A Policy Pract.*, vol. 53, pp. 36–52, Jul. 2013.
- [44] L. Moreira-Matias, O. Cats, J. Gama, J. Mendes-Moreira, and J. F. de Sousa, "An online learning approach to eliminate Bus Bunching in real-time," *Appl. Soft Comput.*, vol. 47, pp. 460–482, Oct. 2016.
- [45] Infodev EDI inc, "Automatic Passenger Counting Solutions." [Online]. Available: <http://www3.infodev.ca/transit/automatic-passenger-counting/>. [Accessed: 29-Oct-2017].
- [46] Retail Sensing, "Automatically Counting Passengers." [Online]. Available: <http://www.retailsensing.com/automated-passenger-counting.html>. [Accessed: 29-Oct-2017].
- [47] C. H. Chen, Y. C. Chang, T. Y. Chen, and D. J. Wang, "People counting system for getting in/out of a bus based on video processing," *Proc. - 8th Int. Conf. Intell. Syst. Des. Appl. ISDA 2008*, vol. 3, pp. 565–569, 2008.
- [48] Sumo, "Simulation of Urban MObility - Wiki," 2017. [Online]. Available: [http://sumo.dlr.de/wiki/Simulation\\_of\\_Urban\\_MObility\\_-\\_Wiki](http://sumo.dlr.de/wiki/Simulation_of_Urban_MObility_-_Wiki). [Accessed: 09-Nov-2017].
- [49] Google, "Transims," 2017. [Online]. Available: <https://code.google.com/archive/p/transims/>. [Accessed: 09-Nov-2017].
- [50] MATsim, "MATsim multi-agent transport simulation," 2017. [Online]. Available: <http://www.matsim.org/>. [Accessed: 09-Nov-2017].
- [51] D. Krajzewicz, J. Erdmann, M. Behrisch, and L. Bieker, "Recent Development and Applications of SUMO - Simulation of Urban MObility," *Int. J. Adv. Syst. Meas.*, vol. 5, pp. 128–138, 2012.

- [52] Kittelson & Associates et al., *Transit Capacity and Quality of Service Manual*, 2nd ed. Washington D.C.: Transportation Research Board, 2003.
- [53] Cámara de comercio de Bogotá, “Encuesta de percepción sobre las condiciones calidad y servicio del TransMilenio SITP y TPC - 2016,” Bogotá, 2016.
- [54] Secretaría Distrital de Movilidad, “Informe de indicadores - Encuesta de Movilidad de Bogotá 2011,” 2012.
- [55] Alcaldía Mayor De Bogotá D.C. - Hacienda - Unidad Administrativa Especial De Catastro Distrital - IDECA, “Mapa de Bogotá.” [Online]. Available: <http://mapas.bogota.gov.co/>. [Accessed: 01-Sep-2017].