



FACULTAD DE INFORMÁTICA
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

TESIS DE MÁSTER
MÁSTER UNIVERSITARIO EN INTELIGENCIA
ARTIFICIAL

OPTIMIZACIÓN DE SISTEMAS BRT:
TRANSMILENIO

AUTOR: FRANCISCO JAVIER PEÑA ESCOBAR

TUTORES: ANTONIO JIMÉNEZ MARTÍN Y ALFONSO MATEOS CABALLERO

JULIO, 2013

AGRADECIMIENTOS

El fruto del desarrollo de este proyecto fin de máster no es solo mío, es también de quienes me han apoyado para poder lograrlo y me siento profundamente agradecido con todos ellos.

En primer lugar, quiero agradecer a Antonio Jiménez por su constante apoyo, sugerencias, por exigirme y por todos los aportes que ha hecho a mi proyecto fin de máster, me siento gratamente sorprendido por su nivel de compromiso con mi proyecto. Al igual que a Antonio, le quiero agradecer mucho a Alfonso por sus correcciones y aportes a mi trabajo, y por exigirme a dar lo mejor de mí.

Quiero agradecerle a mi hermana Laura por ayudarme con algunas secciones del documento, y por sus sugerencias y críticas que han sido realmente valiosas y me han aportado mucho. Quiero agradecer a Lucía por apoyarme durante todo este tiempo y alegrar mi estancia en Madrid, realmente me ha hecho sentir como en Colombia. A mis padres por su constante apoyo y por enseñarme el camino, y a toda mi familia.

También quiero agradecer a Alirio García por toda la información de TransMilenio que me suministró y por la buena disposición que tuvo siempre a la hora de ayudarme.

Quiero agradecer a Mónica por todo el apoyo que me dio en Colombia, gracias a ella pude cumplir mi sueño de estudiar una maestría.

Finalmente, quiero agradecer al Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones de Colombia y a todos los que conforman el programa de Talento Digital por financiar mis estudios y por abrirme las puertas a la educación de posgrado, espero que este proyecto cumpla con sus expectativas. También a Gabriel Hjort Blindell por la plantilla de este documento.

La investigación realizada para el desarrollo de esta Tesis Fin de Máster se enmarca en los proyectos de investigación “Riesgo: Análisis, Gestión y Aplicaciones” financiado por la Comunidad de Madrid (S2009/esp-1685) y el proyecto “Evaluación y Gestión del Riesgo en MCDM” del Ministerio de Ciencia e Innovación (MTM2011-28983-Co3-03), en los que participan los directores de la tesis.

Francisco J. Peña
Madrid, Julio de 2013

RESUMEN

Los sistemas de autobuses rápidos (*Bus Rapid Transit* o BRT) son sistemas de transporte masivo de capacidad mediana/alta, servicio de alta calidad y bajos costes de infraestructura y operación. Este tipo de sistemas permiten la creación de rutas express, en las cuales los autobuses no se detienen en todas las estaciones a lo largo de un trayecto. Esta característica reduce los tiempos de viaje y aumenta la capacidad del sistema. Para lograr esto, se requiere diseñar planes operativos altamente eficientes.

TransMilenio es el sistema de transporte masivo más importante de la ciudad de Bogotá y uno de los sistemas BRT más grandes del mundo, a pesar de que solo ha completado su tercera fase de construcción de las ocho que hay planificadas. En la actualidad, TransMilenio presenta serios problemas de congestión, ya que la demanda de pasajeros es mayor a la capacidad que posee el sistema.

En este proyecto fin de máster se lleva a cabo un estudio de los sistemas BRT y de TransMilenio, y se revisan las propuestas que hay en la literatura para optimizar la operación de este tipo de sistemas con un énfasis especial en TransMilenio. Finalmente, se propone un modelo matemático que adapta elementos de las propuestas revisadas e incorpora elementos novedosos teniendo en cuenta las características de TransMilenio.

ABSTRACT

Bus rapid transit (BRT) systems are massive transport systems with medium/high capacity, high quality service and low infrastructure and operating costs. These kind of systems allow to create express services, in which buses skip stations along a path. This feature reduces travel times and increases the system's capacity. In order to achieve this, highly efficient scheduling plans must be designed.

TransMilenio is Bogotá's most important mass transportation system and one of the biggest BRT systems in the world, although it has only completed its third construction phase out of a total of eight. Currently, TransMilenio has serious overcrowding issues, due to the high passenger demand levels, which are higher than the system's capacity.

In this master's project a study on BRT systems and TransMilenio is conducted, we review the proposals in the literature to optimize BRT system operation, with a special emphasis on TransMilenio. Finally, we propose a mathematical model that adapts elements of the above proposals and incorporates novel elements accounting for the features of TransMilenio system.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|--|------|
| AGRADECIMIENTOS | III |
| RESUMEN | V |
| ABSTRACT | VII |
| ÍNDICE GENERAL | IX |
| ÍNDICE DE FIGURAS | XI |
| ÍNDICE DE TABLAS | XIII |
| 1 INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1. Motivación | 1 |
| 1.2. Descripción general del documento | 2 |
| 2 OBJETIVOS | 3 |
| 2.1. Estrategia | 4 |
| 3 LOS SISTEMAS BRT | 5 |
| 3.1. Historia | 6 |
| 3.2. Elementos principales de un sistema BRT | 6 |
| 3.3. Comparación con otros sistemas de transporte masivo | 10 |
| 4 EL TRANSPORTE EN BOGOTÁ Y EL SISTEMA TRANSMILENIO | 13 |
| 4.1. El transporte en Bogotá | 13 |
| 4.2. TransMilenio | 17 |
| 5 PROPUESTAS Y METODOLOGÍAS EN SISTEMAS BRT: ESTADO DEL ARTE | 33 |
| 5.1. Propuestas de optimización de sistemas BRT | 33 |
| 5.2. Propuestas de optimización de TransMilenio | 37 |
| 5.3. Análisis de los estudios previos | 39 |
| 6 UN NUEVO MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA SISTEMAS BRT | 45 |

| | | |
|------|--|----|
| 6.1. | Problema | 45 |
| 6.2. | Función de coste | 48 |
| 6.3. | Restricciones | 53 |
| 6.4. | El nuevo modelo | 56 |
| 7 | CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS | 61 |
| 7.1. | Trabajos futuros | 63 |
| 8 | ANEXOS | 67 |
| 8.1. | Artículo presentado a FORS40 | 67 |
| 9 | BIBLIOGRAFÍA | 79 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| 3.1. Evolución del número de ciudades con sistemas BRT por año | 7 |
| 3.2. Capacidad de pasajeros y costes para opciones de transporte masivo . | 12 |
| 4.1. Modo de transporte en la ciudad de Bogotá - 2009 | 14 |
| 4.2. Paisaje típico de las calles de Bogotá antes de TransMilenio | 14 |
| 4.3. Mapa general de TransMilenio | 19 |
| 4.4. Distribución de la demanda a lo largo de la semana | 27 |
| 4.5. Distribución de la demanda a lo largo del día | 28 |
| 4.6. Demanda de pasajeros para la hora punta de corredores de Fase I y II | 29 |
| 4.7. Demanda de pasajeros para las principales estaciones de TransMilenio | 30 |
| 4.8. Mapa de retornos operacionales de TransMilenio | 32 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| 3.1. Costes de infraestructura de los diferentes sistemas de transporte masivo | 10 |
| 4.1. Corredores del sistema TransMilenio | 18 |
| 4.2. Velocidades medias de los distintos corredores en el año 2007 | 23 |
| 4.3. Capacidad máxima real de algunos sistemas de transporte masivo alrededor del mundo | 24 |
| 4.4. Efectos de la interfaz vehículo-plataforma y el tamaño del vehículo en la capacidad | 24 |
| 4.5. Capacidad de las estaciones de acuerdo al número de plataformas | 25 |
| 4.6. Capacidad de las intersecciones críticas en las troncales | 27 |
| 5.1. Comparación de propuestas para la optimización de sistemas BRT | 43 |
| 5.2. Técnicas usadas para la optimización de sistemas BRT | 44 |
| 7.1. Técnicas usadas para la optimización de sistemas BRT | 63 |

INTRODUCCIÓN

1.1 MOTIVACIÓN

MUCHAS CIUDADES EN vías de desarrollo han alcanzado niveles de población de varios millones de habitantes. Estas ciudades requieren sistemas de transporte masivo, pero debido a los altos costes asociados a los sistemas metro y tranvía, su construcción se vuelve inviable. Afortunadamente, los autobuses de tránsito rápido (BRT por sus siglas en inglés) han demostrado ser una alternativa asequible de un sistema con capacidad mediana y alta. Desde el año 2000 116 ciudades han construido sistemas BRT y hay 84 más que están planteándose construir.

Los sistemas BRT son sistemas de transporte público basados en autobuses que circulan por carriles exclusivos y recogen pasajeros en estaciones, de forma muy similar a los sistemas de metro. Se diferencian de los sistemas de metro en que tienen carriles de adelanto en las estaciones, lo cual permite la creación de servicios express, en los cuales los autobuses pueden omitir parar en ciertas estaciones, y en consecuencia, reducir los tiempos de viaje. Las estaciones tienen múltiples plataformas de abordaje, de forma tal que varios autobuses puedan recoger pasajeros de forma simultánea.

TransMilenio es el sistema BRT de la ciudad de Bogotá y uno de los más importantes del mundo. Fue el primer sistema BRT de alta capacidad, cuenta con más capacidad que muchos sistema de metro, y transporta cerca de 2 millones de pasajeros al día. Sin embargo, actualmente el sistema está presentando problemas de capacidad por la alta demanda que tiene, lo cual ha generado grandes problemas de congestión de vehículos y pasajeros en las estaciones, y congestión de pasajeros dentro de los autobuses. Esto ha impactado negativamente la calidad del servicio prestado y la imagen que los ciudadanos tienen acerca del sistema.

En este trabajo fin de máster se estudian en detalle los sistemas BRT y en particular TransMilenio, y se hace una revisión del estado del arte con el objetivo

de plantear un nuevo modelo que permita mejorar y hacer más eficientes a los planes de operación de TransMilenio. Este modelo permitirá reducir los tiempos de espera de los usuarios en el sistema, los costes de operación, teniendo en cuenta las limitaciones de capacidad de TransMilenio. De esta forma, se espera reducir los niveles de congestión y contribuir a la mejora de la calidad del servicio y la imagen de TransMilenio.

1.2 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL DOCUMENTO

En el Capítulo 2 se presentan los objetivos de este trabajo fin de máster junto con la estrategia que se usa para alcanzarlos.

En el Capítulo 3 se introducen los sistemas BRT, se habla de su historia, se describen los elementos que los componen, y se hace una comparación de los mismos contra otro tipo de sistemas de transporte masivo en términos de costes de infraestructura, costes de operación, tiempos de implementación y capacidad.

En el Capítulo 4 se presenta una reseña de la problemática de transporte en la ciudad de Bogotá antes de la llegada de TransMilenio, se da una descripción detallada del sistema TransMilenio, incluyendo aspectos como la infraestructura, el sistema de recaudación, la velocidad, la capacidad, la demanda, la tarificación y los aspectos y estrategias que incrementan la capacidad de TransMilenio.

En el Capítulo 5 se revisan las propuestas que se encontraron para la optimización de sistemas BRT y de TransMilenio en particular, se hace un análisis de estas propuestas, describiendo sus ventajas y desventajas. Finalmente se identifican las propuestas que mejor se pueden adaptar a la operación de TransMilenio para comenzar a elaborar un nuevo modelo.

En el Capítulo 6 se reúne toda la información que se ha recogido en los capítulos anteriores y en base a esto se formula el problema a resolver. Posteriormente, se elabora una función de coste que permita determinar la calidad de una solución. Se imponen las restricciones asociadas a la operación de TransMilenio, de forma tal que las soluciones encontradas por el modelo sean factibles. Por último se presenta el nuevo modelo en su totalidad.

En el Capítulo 7 se presenta un resumen del trabajo realizado y se presentan las conclusiones a las que se ha llegado. También se sugieren líneas de investigación futuras en base a los aspectos que no han sido contemplados en el modelo propuesto. Estas líneas de investigación son el punto de partida para la tesis doctoral.

En el Capítulo 8.1 se presenta el artículo derivado de este proyecto fin de máster: "A First Approach to the Optimization of Bogotá's TransMilenio BRT System" el cual fue aceptado en el congreso internacional FORS40 - Finnish Operations Research 40th Anniversary Workshop. El congreso incluye revisión por pares de los trabajos aceptados. Adicionalmente, se presentan los mapas de todas las rutas que operan actualmente en TransMilenio.

OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo fin de máster es realizar una investigación para conocer en detalle el funcionamiento de los sistemas BRT y en particular de TransMilenio. Esta investigación debe cubrir los aspectos técnicos del sistema e incluir también una revisión del estado del arte de las propuestas que se han hecho para la mejora de este tipo de sistemas por medio de los planes de operación de los autobuses. Finalmente, basándose en los resultados de esta investigación, proponer un modelo que contemple los problemas identificados y que sea innovador. El trabajo realizado en este proyecto fin de máster será la base para una futura tesis doctoral. Los objetivos de este trabajo son:

1. Realizar un estudio de los sistemas BRT, teniendo en cuenta los siguientes aspectos:
 - componentes de infraestructura,
 - desempeño,
 - comparación con otros sistemas de transporte masivo.
2. Realizar un estudio detallado de TransMilenio, en el cual se pueda conocer la infraestructura del sistema, los planes de operación, las estrategias utilizadas para mejorar el desempeño y los cuellos de botella que pueda tener el sistema.
3. Elaborar un estado del arte en el que se identifiquen las técnicas que se han propuesto para optimizar la operación de los sistemas de BRT y en particular de TransMilenio. Se deben identificar las ventajas y las desventajas de cada una de las propuestas revisadas.
4. En base a la revisión de propuestas del objetivo anterior, proponer un modelo innovador para optimización del sistema que cubra una o varias de las carencias identificadas al elaborar el estado del arte. El modelo debe de estar compuesto por una función de coste que determine qué tan bueno es un plan de operación, y por las restricciones asociadas a la operación.

2.1 ESTRATEGIA

El proyecto fin de máster está dividido en tres fases:

1. *Estudio de los sistemas BRT y de TransMilenio.* En esta fase se recopilan todos los documentos técnicos y estudios acerca de sistemas BRT y de TransMilenio. También se mantienen conversaciones con expertos de TransMilenio que permitan obtener información adicional que no esté presente en los documentos, y se les pide a los expertos que suministren la información necesaria para la elaboración del modelo.
2. *Estudio de la literatura que trate de la optimización de sistemas BRT.* En esta fase se revisan todas las propuestas que haya para optimizar este tipo de sistemas y se identifican las que mejor se pueden adaptar a TransMilenio. Además, se identifican los elementos que las propuestas no contemplan y que son de gran importancia para la operación de TransMilenio.
3. *Elaboración de un nuevo modelo.* En esta fase se reúne toda la información obtenida en las fases anteriores para elaborar un modelo que contemple uno o varios de los problemas que se han identificado y permita resolverlos. En la primera parte de esta fase se debe diseñar una función de coste, y se finaliza con la inclusión de todas las restricciones necesarias para la correcta operación del sistema TransMilenio.

LOS SISTEMAS BRT

LOS SISTEMAS DE autobuses de tránsito rápido o *Bus Rapid Transit* (BRT) son sistemas de transporte masivo con capacidad mediana/alta, de alta calidad de servicio y bajos costes de infraestructura y operación (Wright & Hook, 2007).

Se presentan como una alternativa asequible para las ciudades en desarrollo para proporcionar a la ciudadanía una oferta de transporte masivo de alta calidad que pueda ser autosostenible, equiparable con los sistemas de rieles pero sin los altos costes y sin llevar a altos niveles de endeudamiento a la ciudad, pudiendo dedicar los fondos a áreas más prioritarias como salud y educación.

Tienen muchos elementos en común con los sistemas de rieles, especialmente en lo relacionado con el desempeño y el servicio al cliente. La diferencia principal entre los sistemas de BRT y los sistemas de rieles está en los costes de operación e implementación, y esto permite brindar un servicio de transporte de alta calidad que las ciudades en desarrollo pueden costear. Su implementación puede costar entre 4 y 20 veces menos que un sistema de metro ligero y entre 10 y 100 veces menos que un metro pesado.

Wright y Hook (2007) ofrecen una muy buena definición de qué es un sistema BRT, la cual se presenta a continuación:

Bus Rapid Transit (BRT) *“Es un sistema basado en autobuses de alta calidad, que proporciona movilidad urbana rápida, cómoda y con un coste-beneficio favorable a través de la provisión de infraestructura segregada de uso exclusivo, operaciones rápidas y frecuentes, y excelencia en marketing y servicio al usuario/cliente”.*

3.1 HISTORIA

Antes de que naciera el primer sistema BRT muchos sistemas iniciaron con un corredor exclusivo para autobuses, el primero de ellos fue el sistema de autobuses de Nueva York en 1964 que tenía autobuses que iban en sentido contrario al tráfico. En países como Estados Unidos (St. Louis 1966, Virginia del Norte 1969, Los Ángeles 1973), Bélgica (Liege 1966), Inglaterra (Runcorn 1972, Londres 1972) y Perú (Lima 1972) también se crearon sistemas con carriles centrales exclusivos para autobuses. No fue hasta 1974 cuando emergió el primer sistema formal de BRT en la ciudad de Curitiba en Brasil (Wright & Hook, 2007).

El sistema BRT de Curitiba fue planeado en 1972, se comenzó a construir en 1973 y en 1974 abrió sus puertas al público. Irónicamente, inicialmente se planificó construir un sistema de metro, pero debido a falta de presupuesto no se pudo llevar a cabo. Fue entonces cuando bajo el liderazgo del alcalde de Curitiba, Jaime Lerner, se inició la construcción de un sistema de carriles exclusivos para autobuses. Muchas ciudades de Brasil comenzaron a desarrollar este tipo de sistemas siguiendo el ejemplo de Curitiba, al igual que otras en Europa y Estados Unidos (Wright & Hook, 2007).

Hasta la década de 1990, este tipo de sistemas se veían como soluciones de transporte masivo para ciudades pequeñas o como sistemas complementarios de una red de metro. Muchos expertos consideraban que el sistema no podría alcanzar una capacidad superior a los 12.000 pasajeros por hora por dirección (pphpd). Esta percepción cambió radicalmente en el año 2000 con la aparición del sistema TransMilenio en la ciudad de Bogotá. De la mano del alcalde Enrique Peñalosa, Bogotá implementó su sistema BRT TransMilenio en un lapso de tan solo 3 años. El proyecto fue concebido en 1998 y comenzó a operar a finales del año 2000 (Wright & Hook, 2007). Actualmente, el sistema transporta cerca de 500 millones de personas anualmente (Observatorio de Movilidad, 2011). TransMilenio introdujo una serie de mejoras que permitieron incrementar en gran medida la capacidad de los sistemas BRT hasta 45.000 pphpd e inspirar a muchas ciudades alrededor del mundo a implementar este tipo de sistemas (Wright & Hook, 2007).

Actualmente, hay 149 ciudades que cuentan con sistemas de BRT, y hay planificados 84 más. Como se puede ver en la Figura 3.1, la mayoría de sistemas han sido construidos después del año 2000, lo cual puede ser atribuible al éxito de TransMilenio.

3.2 ELEMENTOS PRINCIPALES DE UN SISTEMA BRT

Aunque hay algunas diferencias entre lo que dicen varios autores acerca de cuáles son los componentes principales de los sistemas BRT (Wright & Hook, 2007; Hinebaugh, 2009; Levinson *et al.* 2003), finalmente todos comparten los mismos elementos y se refieren a lo mismo.

Wright y Hook (2007) establecen múltiples características que dan forma a un sistema BRT, las cuales caben dentro de los siguientes cinco grupos:

Sistemas BRT en el mundo

➤ Evolución del número de ciudades y km por década

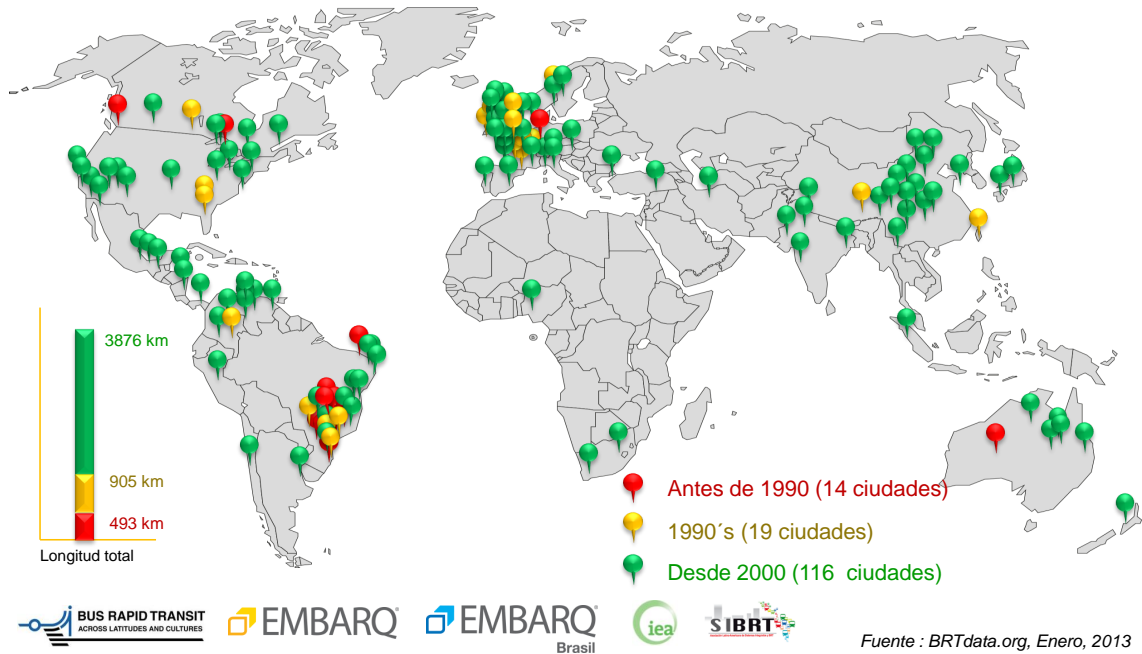


FIGURA 3.1 – Evolución del número de ciudades con sistemas BRT por año («Panorama of BRT and bus corridors in the world», 2013).

1. Infraestructura física
2. Operaciones
3. Estructura de negocios e institucional
4. Tecnología
5. Marketing y servicio al cliente

Debido a que no todos los sistemas BRT actuales cumplen con todas las características mencionadas, y que muchas de éstas dependen del contexto en el que opera el sistema, como por ejemplo, tamaño de la ciudad, población, entre otros; Wright y Hook (2007) establecen que para que un sistema de BRT sea completo se deben cumplir ciertas características, las que se describirán más adelante junto con los elementos principales de los sistemas BRT.

Por su parte, Hinebaugh (2009) define siete elementos principales que forman parte de los sistemas BRT, los cuales se describen a continuación.

3.2.1 Corredores

Los corredores son el elemento principal de los sistemas BRT y es por donde circulan los vehículos; son como los rieles en los sistemas de metro. El cómo se construyan los corredores impactará de forma crítica en la velocidad y fiabilidad de todo el sistema. También son el elemento más costoso y uno de los más visibles de todo el sistema, por lo que tendrá un impacto directo en la imagen y percepción que los usuarios tienen del mismo (Hinebaugh, 2009).

Los corredores deben ser de uso exclusivo por los autobuses del sistema, además, los corredores deben estar en la parte central de la vía y no en los laterales (Wright & Hook, 2007).

3.2.2 Estaciones

Las estaciones son el enlace que hay entre las personas, el sistema BRT y otros sistemas de transporte. Son el elemento que más influye en la imagen del sistema y, por tanto, deben tener instalaciones cómodas para que los usuarios se sientan a gusto. Debido a que se encuentran en corredores con alta demanda, las estaciones de un sistema BRT deben alojar muchas más personas que una parada de autobús, por lo que deben contar con una infraestructura amplia (Hinebaugh, 2009).

Las estaciones deben ser grandes, seguras y cómodas. Además, deben proteger al usuario de las condiciones climáticas. Las plataformas de las estaciones deben estar a la misma altura que el piso de los autobuses para facilitar y agilizar el acceso de los usuarios. También debe haber estaciones de cabecera en los extremos de cada corredor troncal que tengan gran capacidad y que permitan la integración entre rutas troncales y alimentadoras (Wright & Hook, 2007).

3.2.3 Vehículos

Los vehículos son el elemento del sistema en el que los pasajeros pasan la mayoría del tiempo. Tienen un impacto directo en la velocidad, capacidad, confort y amigabilidad con el medio ambiente. Son el elemento que más ven los no-usuarios y por esta razón son uno de los elementos que más influencia tienen sobre la percepción del público sobre el sistema (Hinebaugh, 2009).

Actualmente hay tres tipos de vehículos operando:

- *Autobuses articulados*: Tienen una capacidad de 160 personas y operan sobre los corredores troncales.
- *Autobuses biarticulados*: Tienen una capacidad entre 240 y 270 personas y operan sobre los corredores troncales.
- *Autobuses sencillos*: Tienen una capacidad de alrededor de 90 personas. En algunas ciudades operan solamente en corredores mixtos de rutas alimentadoras. En otras ciudades con sistemas BRT de menor capacidad operan en los corredores troncales.

3.2. ELEMENTOS PRINCIPALES DE UN SISTEMA BRT

3.2.4 *Recaudación de tarifa (Cobro de tiquetes)*

La recaudación de tarifa tiene un efecto directo sobre la capacidad y los ingresos del sistema. Juega un papel importante para la disminución de tiempos de espera de los pasajeros, aumentándose la eficiencia en el abordaje a los autobuses en los casos en que la recaudación de la tarifa se hace fuera del autobús. Esto es especialmente útil para las rutas que tienen mucha demanda (Hinebaugh, 2009).

La tarifa se debe recaudar fuera del autobús, a la entrada de la estación. Además, esta tarifa debe ser integrada, es decir, que un usuario puede hacer transbordo entre las diferentes rutas del sistema sin realizar pagos adicionales, incluyendo las rutas alimentadoras (Wright & Hook, 2007).

3.2.5 *Sistemas de transporte inteligentes (ITS)*

Es un componente tecnológico que ayuda a mejorar el desempeño global del sistema. Es una combinación de diferentes tecnologías para recopilar todo tipo de datos de la operación del sistema, desde el número de pasajeros que ingresan al sistema, el promedio de velocidades de los vehículos, al posicionamiento de cada vehículo por medio de GPS, los tiempos de partida de los vehículos, el estado de las vías, los semáforos, entre otros. El objetivo de este elemento es recopilar toda la información posible para transformarla en conocimiento útil que sirva a los operadores, y finalmente se traduzca en beneficios para los pasajeros (Hinebaugh, 2009).

3.2.6 *Planes de servicio y operación*

El diseño de un buen plan de rutas afecta directamente la percepción que el usuario tiene sobre el sistema. Un buen plan permite ajustarse a la demanda que se presenta sobre los corredores, debe tener servicios frecuentes para minimizar los tiempos de espera y un buen diseño también ayudará a disminuir el número de transbordos que el usuario deba hacer. Además, los mapas de rutas deben ser fáciles de entender para el usuario (Hinebaugh, 2009).

Las rutas tanto alimentadoras como troncales deben estar integradas físicamente, formando una red. Además, la entrada a otros operadores de transporte público debe estar restringida (Wright & Hook, 2007).

3.2.7 *Elementos de marca*

Los sistemas BRT deben tener una marca que los distinga de otros sistemas de transporte. Una buena estrategia de marketing puede posicionar la marca del sistema y darle una imagen *premium*, lo cual va a atraer a más usuarios. Es muy importante darle una buena imagen al sistema BRT, y es uno de los requisitos que Wright y Hook (2007) establecen para que un sistema BRT sea completo (Hinebaugh, 2009).

3.3 COMPARACIÓN CON OTROS SISTEMAS DE TRANSPORTE MASIVO

Para contextualizar al lector acerca de las ventajas que tienen los sistemas BRT, en esta sección se exploran otros sistemas de transporte masivo y se comparan muchas de las características que tiene cada sistema con las de los sistemas BRT. Además, se comparan costes y tiempos de construcción, y se exponen casos reales.

3.3.1 Costes de infraestructura

Wright y Hook (2007) hacen una comparación basada en datos reales de los costes de infraestructura de distintos sistemas de transporte masivo. Los rangos de precios para cada sistema de transporte masivo se muestran en la Tabla 3.1.

| Tipo de sistema | Coste por kilómetro (US\$ millones/km) |
|-------------------------------|--|
| BRT | 0,5 - 15 |
| Tranvía a nivel y tren ligero | 13 - 40 |
| Sistemas elevados | 40 - 100 |
| Metro subterráneo | 45 - 350 |

TABLA 3.1 – Costes de infraestructura de los diferentes sistemas de transporte masivo (Wright & Hook, 2007).

Como se puede apreciar en la Tabla 3.1 los costes de infraestructura para un sistema BRT son significativamente menores que para cualquier otro tipo de sistemas basado en rieles.

Para ilustrar la magnitud de las diferencias tomemos como referencia el caso de la ciudad de Bangkok, en la que hay un sistema de tren elevado (Skytrain) y un sistema de metro subterráneo (MRTA), un sistema propuesto de BRT (Smartway) y un sistema propuesto de tren ligero. Los costes reales por kilómetro de los sistemas de metro y tren elevado fueron de US\$ 142,9 millones y US\$ 72,5 millones. Los costes proyectados por kilómetro para los sistemas propuestos de tren ligero y BRT son de US\$ 25 millones y US\$ 2,34. Esto significa que con un presupuesto de US \$1.000 millones se podrían construir 7 km de metro subterráneo, 14 km de tren elevado, 40 km de tren ligero o 426 km de BRT (Wright & Hook, 2007).

3.3.2 Costes de operación

A diferencia de lo que sucede con muchos sistemas sobre rieles en todo el mundo, los sistemas BRT son capaces de operar sin subsidio por parte de los gobiernos, e incluso son rentables, por lo cual muchos gobiernos delegan la operación a empresas del sector privado. Esto representa una ventaja especialmente útil para las ciudades en desarrollo, cuyos gobiernos cuentan con poco presupuesto y nada

3.3. COMPARACIÓN CON OTROS SISTEMAS DE TRANSPORTE MASIVO

mejor que un sistema de transporte masivo autosostenible que les permita invertir los recursos en otras áreas como alcantarillado, educación y salud.

Uno de los mejores ejemplos para comparar los costes de operación los ofrece la ciudad de Porto Alegre en Brasil. Porto Alegre cuenta con un sistema de riel urbano y con un sistema BRT. El sistema de riel urbano requiere un subsidio de 70% por cada viaje de un pasajero, mientras que el sistema BRT tiene una tarifa similar, no requiere subsidio y deja ganancias a las compañías privadas que se encargan de la operación de los autobuses (Wright & Hook, 2007).

3.3.3 *Tiempos de planificación e implementación*

Los elevados tiempos de planificación e implementación que pueden tener los sistemas basados en rieles pueden ser un problema para el futuro de una solución de transporte masivo. La ciudad de Bogotá fue, en varias ocasiones, víctima de esta problemática, ya que durante seis décadas se presentaron diversas propuestas de sistemas basados en rieles que nunca llegaron a concretarse, ya fuera porque no había el presupuesto suficiente o porque la fase de planificación duraba hasta la siguiente alcaldía y el siguiente gobierno decidía no seguir adelante con el plan (Wright & Hook, 2007).

En cambio, los sistemas de BRT pueden ser planificados e implementados en periodos cortos de tiempo, que pueden ser abarcados en una única legislatura o periodo de gobierno. Los dos sistemas BRT más exitosos y completos, que son los de Curitiba y Bogotá, fueron implementados en un lapso de tres años.

3.3.4 *Capacidad*

Antiguamente se pensaba que los servicios basados en autobuses podían operar en un rango de hasta 6.000 pphpd. En caso de que la demanda del corredor fuera superior a esto, se debía recurrir a un sistema de tren ligero, cuya capacidad está en el rango de 6.000 a 12.000 pphpd. Si la demanda era superior se debía recurrir a un sistema de metro pesado cuya capacidad está en el rango que va desde 25.000 hasta 80.000.

Todo esto cambió con la llegada de los sistemas BRT, que ofrecen un rango de capacidad que va desde los 3.000 hasta los 45.000 pphpd. A partir de este momento los sistemas BRT se volvieron una alternativa real de transporte masivo para grandes ciudades y se rompió con el mito de que los sistemas BRT no pueden competir con los sistemas de metro en términos de capacidad. De hecho, no es necesariamente cierto que las grandes ciudades requieran de capacidades desbordantes, un ejemplo de esto es el sistema de metro de Londres, que tiene una capacidad de 30.000 pphpd, pero que gracias a sus múltiples líneas paralelas ha distribuido la demanda de los corredores a través de toda la red de transporte. Un caso contrario a éste es el del metro de Hong Kong, que tiene una capacidad para 80.000 pphpd en el cual hay una sola línea desde Kowloon y New Territories hasta Nathan Road, pero es esta alta demanda lo que permite que este sistema de metro sea rentable (Wright & Hook, 2007).

En la Figura 3.2 se comparan los rangos de capacidad de las distintas tecnologías contra los rangos de costes de infraestructura. Estos rangos están basados en datos reales y no teóricos. Una apreciación muy importante es que la amplitud en el eje X (eje de la capacidad) denota la flexibilidad del sistema para adaptarse a las necesidades de capacidad de la ciudad. Por otro lado, la amplitud en el eje Y (eje que da el coste de infraestructura por kilómetro) muestra los niveles de incertidumbre y riesgo que en cuanto a costes se puede llegar a tener. Cuanto mayor sea la amplitud en el eje Y, mayor será la incertidumbre y riesgo potencial de cuánto puede llegar a costar un sistema. Un sistema ideal es aquel que tiene una franja muy amplia en el eje X, y una franja muy estrecha en el eje Y (Wright & Hook, 2007).

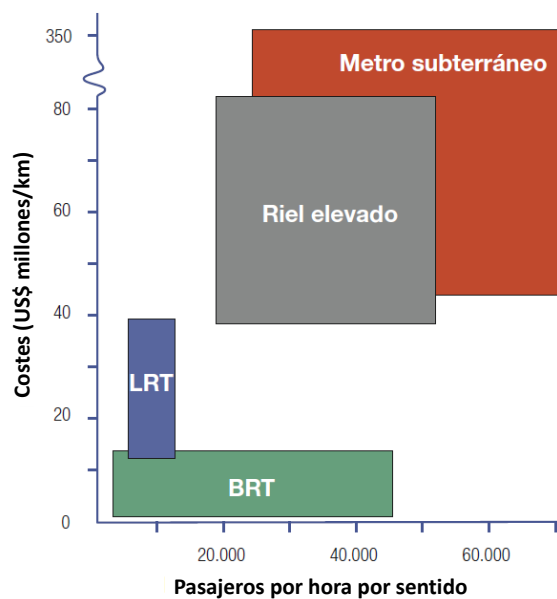


FIGURA 3.2 – Capacidad de pasajeros y costes capitales para opciones de transporte masivo (Wright & Hook, 2007).

EL TRANSPORTE EN BOGOTÁ Y EL SISTEMA TRANSMILENIO

4.1 EL TRANSPORTE EN BOGOTÁ

Bogotá es la capital de Colombia y tiene una población que ronda los ocho millones de habitantes (DANE, 2010), lo que la convierte en la ciudad más poblada de Colombia. Se encuentra ubicada sobre una meseta de la cordillera oriental andina a una altura de 2.600 metros sobre el nivel del mar.

Tiene un área metropolitana de 1.587 km², lo que la convierte en la ciudad más extensa de Colombia, una de las más grandes de Latinoamérica y está entre las 30 ciudades más grandes del mundo («World City Information - Bogotá», 2013). Su densidad poblacional es de 240 habitantes por hectárea.

Como se puede ver en la Figura 4.1, en la ciudad de Bogotá más de la mitad de los viajes se realizan en transporte público (incluyendo TransMilenio), el 12 % de los viajes se hacen a pie (Observatorio de Movilidad, 2010), y solo el 25 % en vehículos particulares.

Uno de los problemas más grandes que ha tenido la ciudad de Bogotá durante décadas ha sido la movilidad de sus ciudadanos. El problema de tráfico ha contribuido a la disminución de la calidad de vida de los mismos. Esto se debe a las bajas velocidades de transporte sobre los corredores viales, lo cual se traduce en mayores tiempos de viaje, mayores costes de operación para los transportistas y mayor contaminación ambiental. En algunos corredores las velocidades promedio han llegado a ser tan bajas como 10 km/h, y en hora punta incluso menores, llegando a 5 km/h (Chaparro, 2002).

Tomando como referencia diversos estudios del año 1999, el 67 % de la población que se movilizaba en transporte motorizado lo hacía en autobuses públicos. En contraste, la ocupación de las vías era del 64 % por el transporte privado y

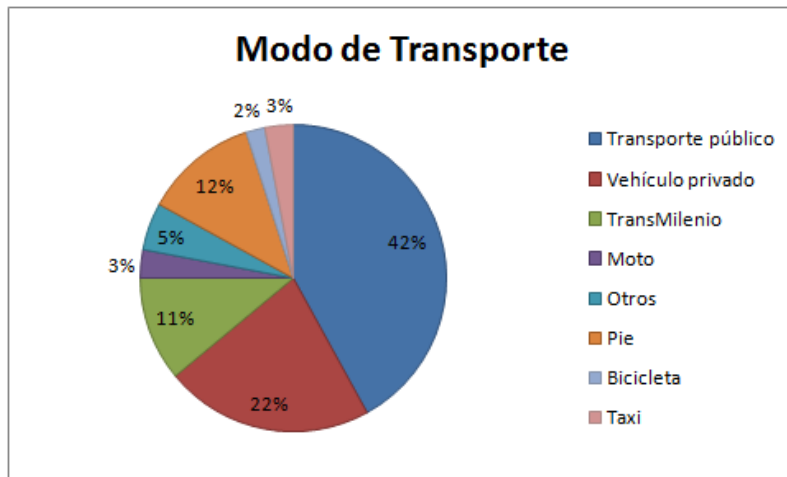


FIGURA 4.1 – Modo de transporte en la ciudad de Bogotá - 2009 (Observatorio de Movilidad, 2010).

solo 27% por el transporte público. Esto evidencia una clara priorización del transporte privado sobre el público (Chaparro, 2002).



FIGURA 4.2 – Paisaje típico de las calles de Bogotá antes de TransMilenio (Cain *et al.* 2006).

El sistema de transporte tradicional. El problema del sistema tradicional de transporte de Bogotá se explica en detalle en Ardila-Gómez (2004), a continuación se exponen los elementos más relevantes del mismo:

El problema residía básicamente en que la Secretaría de Tránsito y Transporte (STT) de Bogotá, que es la entidad encargada de la supervisión de las compañías de autobuses y quien vela para que se cumplan las leyes de tránsito en Bogotá, es una entidad pequeña, con poco poder e incapaz de ejercer control sobre las compañías de autobuses.

El esquema de legislación colombiano establece que las compañías de autobuses son las encargadas de la operación de los autobuses y que deben ser dueñas de por lo menos el 10% de la flota, y establece que la STT es la encargada de diseñar las rutas; pero en la práctica esto no ocurre así. Para explicar mejor la problemática vamos a analizarla por cada actor del sistema.

Los dueños de los autobuses. Los dueños de los autobuses generaban ganancias con la cantidad de pasajeros que transportaban a diario. Casi siempre, los dueños contrataban a un chófer para que condujera el autobús durante un turno de 13 o 14 horas diarias, y para incentivarlo le pagaban de acuerdo al número de pasajeros que transportara. Esto provocaba que los chóferes condujeran de forma más agresiva para recoger pasajeros a toda costa, lo cual incrementaba el número de accidentes de tránsito. Estas peleas entre conductores de autobuses por recoger más pasajeros es conocida como “la guerra del centavo”. La guerra del centavo atentaba contra la seguridad de los pasajeros, ya que los conductores hacían carreras entre sí, paraban por periodos de tiempo muy cortos cuando un pasajero quería descender, y en general afectaba negativamente al sistema de tráfico de Bogotá.

Las compañías de autobuses. Más del 96% de las compañías de autobuses eran dueñas de menos del 10% de su flota. Las ganancias las generaban entonces a partir de la concesión de las rutas autorizadas por la STT a los dueños de los autobuses. De esta forma, los dueños de los autobuses debían de pagar una mensualidad de afiliación para poder circular en las rutas y, además, debían pagar una cantidad inicial denominada *cupo*. Debido a este modelo de negocio, el incentivo de las compañías de autobuses era crear nuevas rutas para atraer más dueños de autobuses y así incrementar sus ganancias.

Por su poca capacidad de gestión, la STT no era capaz de realizar los estudios necesarios para el diseño de nuevas rutas, razón por la cual las compañías de autobuses se encargaban de llevar a cabo estos estudios y presentarlos a la STT. La STT después abría una licitación para que compañías de autobuses proponentes se encargaran de cubrir la nueva ruta. Estas licitaciones casi siempre quedaban en manos de la compañía que diseñaba las rutas. Así, las compañías de autobuses lograban la inclusión de nuevas rutas.

Sin embargo, muchas de estas nuevas rutas pasaban por las mismas avenidas, lo que ocasionaba congestión en las vías y agravaba la guerra del centavo. Debido a la inclusión de nuevas rutas, la ocupación de los autobuses comenzó a descender y así los dueños de los autobuses comenzaron a perder rentabilidad. En otras palabras, los dueños de las compañías estaban canibalizando el sistema. Por esta

baja ocupación en los autobuses, los dueños de los autobuses hablaron con el gobierno y con la STT para incluir el número de pasajeros en la fórmula para calcular la tarifa del autobús.

Fue por esta razón que de 1993 a 1997 la tarifa tuvo un incremento real del 83%. De esta forma, los usuarios estaban financiando la ineficiencia del sistema y no estaban obteniendo un mejor servicio.

Como se puede ver, las compañías de autobuses no son responsables de la provisión de los servicios de los autobuses; son simples intermediarios entre los dueños de los autobuses y el gobierno, y son los dueños de los autobuses los verdaderos responsables de proveer los servicios de transporte público.

El gobierno y la STT. Como se puede ver en los párrafos anteriores, la gestión del gobierno era muy pobre para hacer frente a los problemas de tránsito. Esta debilidad se evidenció cuando las protestas por parte de los dueños de los autobuses llevaron al gobierno a cambiar la legislación para que la antigüedad admitida de los autobuses fuera de 25 años y nuevamente para que se admitieran los autobuses de hasta 30 años. Los intentos de la STT de detener la entrada de nuevos autobuses para evitar la congestión de tráfico dieron lugar a la aparición de 9.000 autobuses ilegales o “piratas”.

Todos estos fallos de gestión por parte de las entidades gubernamentales derivaron en una alta inseguridad para los pasajeros, alta accidentalidad en el sistema de tráfico, alta congestión y contaminación por el gran número de autobuses y la antigüedad de los mismos, y en tiempos de viaje largos para los pasajeros. En el año 1997 un pasajero pasaba en promedio 123 minutos al día dentro de un autobús, lo cual es demasiado si se tiene en cuenta que el trayecto medio es de 10 kilómetros.

A lo largo del tiempo, se han realizado muchas propuestas para mejorar la movilidad en Bogotá, muchas de ellas no se han materializado, y otras simplemente fracasaron.

Por ejemplo, el *corredor de la avenida Caracas* fue una de las propuestas que se materializaron, y consistía en dividir el tráfico de la avenida Caracas en carriles exclusivos para transporte público y carriles para particulares. Además, se construyeron estaciones con plataformas para que los pasajeros pudieran abordar fácilmente los autobuses. El proyecto terminó de construirse en 1992 e inicialmente mostró mejorías en la congestión del tráfico, pero debido a la mala administración del corredor vial por la inclusión indiscriminada de autobuses que saturaron el corredor y la falta de mantenimiento en la vía, el proyecto fracasó (Chaparro, 2002).

Durante los años se presentaron distintas propuestas que nunca se materializaron, entre ellas se destacan, JICA, “Solo Bus” y “SITM” (Chaparro, 2002).

Este panorama más que caótico fue el que recibió Enrique Peñalosa cuando tomó posesión como alcalde de Bogotá. Pero para hacer frente a esta problemática tenía una solución: TransMilenio. Peñalosa entendió la situación: “No es culpa de los operadores de autobuses, es del sistema económico tan pobremente diseñado.

4.2. TRANSMILENIO

No es factible que los operadores cambien la situación por ellos mismos. No es un problema de inversión o de educación de los conductores. Es un problema estructural”.

4.2 TRANSMILENIO

TransMilenio es el sistema de transporte masivo más importante de la ciudad de Bogotá, y es uno de los sistemas BRT más importantes del mundo. Está basado en el sistema BRT de la ciudad de Curitiba y debido a su éxito se han generado nuevos planes de expansión en Bogotá, y se han implementado sistemas similares en otras ciudades de Colombia (Cain *et al.* 2006).

En Chaparro (2002) se da una clara definición del sistema TransMilenio: “*TransMilenio se define como un sistema de transporte masivo urbano que opera en forma privada autobuses articulados de alta capacidad y circulan por carriles segregados exclusivos en corredores troncales, los cuales se integran a un sistema de rutas alimentadoras que cubren servicios circulares periféricos con autobuses de capacidad media. El sistema posee estaciones que cuentan con andenes elevados y puertas automáticas coordinadas con las de los autobuses, donde los pasajeros toman o dejan el servicio y es limitado a portadores de boletos. Un sistema de control satelital monitorea permanentemente los autobuses y la tarifa única permite al usuario acceder al servicio troncal y alimentador*”.

En Febrero de 2013 el sistema estaba compuesto por 11 líneas troncales que tienen una longitud total de 105 km (Ángel *et al.* 2010; Páez, 2011). Actualmente ha completado la tercera de ocho fases de construcción.

4.2.1 Modelo de negocio

Uno de los logros más importantes del sistema TransMilenio es la implementación exitosa de un sistema de contratos basado en concesiones para regular a los operadores de servicio. Se cambió la forma en la que se le paga a los operadores de una base de pago “por pasajero” a una base de pago “por kilómetro”, lo cual eliminó el problema de “la guerra del centavo”. La implementación de un proceso de licitación formal para obtener los derechos exclusivos para operar rutas de servicio específicas ha facilitado una competición saludable para el mercado, en contraposición a la competición dañina que se tenía antes de TransMilenio. Sin duda alguna, esto ha mejorado la eficiencia de operación del transporte público (Cain *et al.* 2006).

4.2.2 Infraestructura

La infraestructura de TransMilenio está compuesta por tres elementos fundamentales que permiten su operación, estos son: los corredores troncales, las estaciones y los autobuses.

Los autobuses de TransMilenio circulan por vías exclusivas llamadas *corredores troncales*. En Febrero de 2013 el sistema contaba con 11 corredores troncales con un total de 104,6 km de longitud (véase la Tabla 4.1). Hay dos tipos de corredores: los

que tienen un solo carril y los que tienen dos carriles. El primer tipo de corredores tiene un carril de paso en las estaciones a lo largo de la ruta. Esto permite a los autobuses adelantar y posibilita la creación de rutas express. Los corredores troncales se encuentran sobre las principales vías de la ciudad y se encuentran en los carriles centrales de las avenidas separados físicamente de los carriles de uso mixto (Ángel *et al.* 2010; Chaparro, 2002). El hecho de que los carriles sean de uso exclusivo para los autobuses troncales permite la adopción de reglas internas de circulación y control de la operación que ayudan a mejorar el rendimiento del sistema (Steer Davies Gleave, 2007).

| Corredor | Longitud (km) | Estaciones Sencillas | Estaciones Intermedias | Portales | Garages |
|---|------------------|-------------------------|---------------------------|----------|---------|
| Calle 8o | 10,1 | 11 | 2 | 1 | 0 |
| Caracas (Incluye Ramal Tunal y Eje Ambiental) | 22,0 | 28 | 2 | 2 | 1 |
| Autonorte | 10,3 | 14 | 0 | 1 | 0 |
| Américas | 13,0 | 14 | 3 | 1 | 0 |
| NQS (Central y sur) | 19,3 | 20 | 2 | 1 | 1 |
| Suba | 10,0 | 13 | 0 | 1 | 0 |
| Carrera 10 | 7,7 | 10 | 1 | 1 | N/A |
| Calle 26 | 12,2 | 13 | 1 | 1 | N/A |
| Total | 104,6 | 123 | 11 | 9 | N/A |

TABLA 4.1 – Corredores del sistema TransMilenio.

Como complemento a los autobuses que circulan sobre los corredores troncales, hay autobuses de menor capacidad que circulan por las demás vías de la ciudad. Estas rutas se llaman las rutas alimentadoras y cuentan con puntos de parada preestablecidos (Cain *et al.* 2006).

Los corredores que se encuentran en operación son:

- A** Caracas
- B** Autonorte
- C** Suba
- D** Calle 8o
- E** NQS Central
- F** Américas
- G** NQS Sur
- H** Caracas Sur
- J** Eje Ambiental
- K** Calle 26
- L** Carrera Décima

En la Figura 4.3 se muestra un mapa del sistema TransMilenio.

Mapa general del Sistema TransMilenio



Zonas de TransMilenio

- | | |
|-----------------------------|----------------------------------|
| A Caracas | D Calle 80 |
| B AutoNorte | E NQS Central |
| C Suba | F Américas |
| G NQS Sur | K Calle 26 |
| H Caracas Sur / Usme | L Carrera 10 ^a |
| J Eje Ambiental | |

Convenciones

- Intercambio peatonal entre troncales
- Estación sin intercambio
- Conexión troncal por vía de tráfico mixto

- Buses alimentadores
- Buses especiales
- Buses complementarios
- PAU (Puntos de atención al Usuario)
- Cicloparqueaderos
- Buses intermunicipales

(La información de este mapa está sujeta a la gradualidad de la implementación del SITP y a posibles modificaciones.)

FIGURA 4.3 – Mapa general de TransMilenio (TransMilenio, 2013b).

TransMilenio cuenta con un total de 143 *estaciones* en funcionamiento. Estas estaciones constituyen el área donde el usuario puede moverse y abordar las rutas de autobuses (el “área paga”). Las estaciones están a la misma altura que las puertas de los autobuses, lo cual facilita el acceso a los mismos (Ángel *et al.* 2010; Cain *et al.* 2006). Existen tres tipos de estaciones:

- *Portales*. Éstas son las estaciones principales del sistema y están localizadas al final de cada corredor troncal. Son los puntos de partida y llegada de los autobuses. Además, tienen acceso para las rutas alimentadoras, las cuales, al igual que las rutas troncales, parten y llegan hasta estas estaciones. De esta manera, se facilita el transbordo entre las distintas rutas.
- *Intermedias*. Las estaciones intermedias son similares a las estaciones portales en el sentido de que se pueden hacer transbordos entre las rutas troncales y las rutas alimentadoras, pero difieren de las estaciones portales en que se encuentran en puntos intermedios de los corredores troncales y no en los extremos (Ángel *et al.* 2010).
- *Sencillas*. Estas estaciones son más pequeñas que las dos anteriores y solamente permiten el acceso de autobuses troncales. Se encuentran a lo largo de los corredores troncales con una separación promedio de 500 metros. Son de varios tamaños, permitiendo el acceso de 1, 2 o 3 autobuses en paralelo por cada sentido.

Existen tres *tipos de autobuses* dentro del sistema TransMilenio: Los autobuses regulares, los articulados y los biarticulados. Los *autobuses regulares* son de baja capacidad y se encargan de cubrir las rutas alimentadoras del sistema. Los *autobuses articulados* son autobuses de alta capacidad y recorren los corredores troncales, tienen capacidad para 160 personas (48 sentadas) y tienen 4 puertas, las cuales se abren de forma síncrona con las puertas de las estaciones, permitiendo hacer detenciones con un tiempo promedio de 25 segundos. Los *autobuses biarticulados* son autobuses de muy alta capacidad y permiten transportar hasta 260 personas, y cuentan con 7 puertas. A 30 de Septiembre de 2012, TransMilenio contaba con 1.392 autobuses troncales (articulados o biarticulados) y 574 autobuses alimentadores.

El sistema TransMilenio presenta tres tipos de *servicios troncales*: ruta fácil, express y súper express. También cuenta con un servicio de rutas alimentadoras que no circulan sobre los corredores troncales. Los servicios express y súper express permiten prestar un mejor servicio al usuario, además de una mejor utilización de la flota. Estos servicios benefician al usuario ya que no paran en todas las estaciones, lo cual es un ahorro de tiempo para los pasajeros. Ésta es una de las ventajas más importantes que tienen los sistemas BRT sobre otros tipos de sistemas basados en rieles (TransMilenio, 2013b; Cain *et al.* 2006). De hecho, Leiva *et al.* (2010) mencionan que los servicios express traen grandes beneficios para trayectos largos y para escenarios en los que la demanda de pasajeros no es uniforme en todas las estaciones. Cuanto más dispar sea la demanda, y cuanto más largos sean los trayectos, mayor es el beneficio de incluir servicios express.

Los *tiempos de operación* varían de acuerdo a las rutas y los tipos de servicio.

4.2. TRANSMILENIO

De lunes a sábado hay operación desde las 5:00 hasta las 23:00. Los domingos la operación va desde las 6:00 hasta las 22:00.

Los servicios ruta fácil o corrientes circulan durante todo el día, en cambio hay ciertos servicios express y súper-express que solamente circulan durante las horas punta (las horas en las que el sistema tiene más demanda). Las rutas, frecuencias y horarios se ajustan de acuerdo a los niveles de demanda y son susceptibles de cambiar en el futuro (TransMilenio, 2013b; Cain *et al.* 2006). Los servicios están codificados de acuerdo con una letra/color que indica el corredor hacia donde se dirige y un número identificador (Steer Davies Gleave, 2007). En la Figura 4.3 se muestran los diferentes corredores troncales por donde pasan los distintos servicios.

Los *servicios ruta fácil*, también llamados servicios corrientes, están compuestos por rutas que paran en todas las estaciones a lo largo de un recorrido. Presentan una frecuencia más alta que los demás tipos de servicios.

Los *servicios express* se detienen solamente en ciertas estaciones, entre el 40 % y 60 %, y tienen un promedio de velocidad más alto que el de los servicios ruta fácil. La planificación de las paradas de estos servicios se ha diseñado de acuerdo a la demanda que hay en las distintas estaciones (Cain *et al.* 2006).

Los *servicios súper-express* son muy similares a los servicios express, solamente difieren en que paran en muchas menos estaciones, cerca del 20 % de las estaciones totales del recorrido que hacen. Estos servicios favorecen a los usuarios que hacen recorridos muy largos, ya que paran en muy pocas estaciones (Cain *et al.* 2006).

Los *servicios alimentadores* circulan por los carriles mixtos en los barrios cercanos a las troncales de TransMilenio y su objetivo es facilitar la movilización hacia la estructura troncal. Las rutas alimentadoras hacen recorridos por los distintos barrios de la ciudad para recoger pasajeros y llevarlos a estaciones portales e intermedias. Los autobuses alimentadores tienen una capacidad de 90 pasajeros, 35 de ellos sentados («TransMilenio», 2013c).

4.2.3 Sistema de recaudación

Para la recaudación del dinero TransMilenio usa un sistema de tarjetas electrónicas sin contacto que permiten a los usuarios el acceso a las estaciones. Las tarjetas son de prepago y solamente pueden ser compradas en las estaciones.

Para acceder a las estaciones se debe pasar a través de torniquetes sobre los cuales se desliza la tarjeta de acceso, momento en el que se descuenta la cantidad del pasaje de la tarjeta. Si el saldo de la tarjeta solo alcanza para un viaje, la tarjeta deberá insertarse en el torniquete, de esta forma, todas las tarjetas retornan al sistema. El paso por los torniquetes es obligatorio tanto para la entrada como para la salida. Mientras el usuario no pase por el torniquete de salida, puede hacer uso ilimitado de los autobuses del sistema (Cain *et al.* 2006).

4.2.4 Velocidad

La velocidad de los autobuses del sistema puede dividirse en dos, la de los autobuses corrientes o ruta fácil que se detienen en todas las estaciones, y la de los autobuses express. Los autobuses corrientes tienen una velocidad promedio de 19 km/h, mientras que los autobuses express tienen una velocidad promedio de 32 km/h (Cain *et al.* 2006).

Esto ha significado un aumento notable del promedio de velocidad en los mismos corredores de la ciudad. Por ejemplo, el corredor de la Caracas presentaba velocidades de 12 km/h y la Calle 80 de 18 km/h debido a la sobreoferta de operadores individuales que generaban congestión de tráfico. En su totalidad, el sistema tiene una velocidad promedio de 26 km/h (Cain *et al.* 2006; Wright & Hook, 2007; Observatorio de Movilidad, 2011). Esta velocidad significa un aumento de 15 km/h de la velocidad promedio de transporte público previo a la implementación de TransMilenio (Cain *et al.* 2006).

Sin embargo, como lo demuestra Steer Davies Gleave (2007) en su estudio de capacidad del sistema del 2007, las velocidades no son las mismas en todos los corredores debido a distintos factores, tales como el número de semáforos que hay en cada corredor, el número de carriles, las intersecciones e incluso el tipo de material de que está hecho la calle. Como caso particular se tiene la troncal del Eje Ambiental cuyo corredor está hecho con adoquines debido a que se encuentra en la zona del centro histórico de la ciudad, que es un lugar con mucha densidad peatonal. En la Tabla 4.2 se encuentran las velocidades promedio de los autobuses sobre cada uno de los corredores, según el estudio de capacidad del sistema del 2007.

4.2.5 Capacidad

TransMilenio cuenta con una capacidad de carga máxima de 45.000 pasajeros por hora por dirección (pphpd), lo que le convierte en el sistema BRT con mayor capacidad del mundo y le deja al mismo nivel de muchos sistemas de metro pesados alrededor del mundo, superando incluso a algunos de éstos (véase la Tabla 4.3).

Antes de pasar a detallar la influencia de estos componentes en la capacidad del sistema, vamos a definir qué se entiende por capacidad. El Manual de Capacidad de Tránsito y Calidad del Servicio del Programa de Investigación en Tránsito Cooperativo (Kittelson & Associates and United States. Federal Transit Administration and Transit Cooperative Research Program and Transit Development Corporation, 2003) define la capacidad en personas de cualquier ruta o corredor de transporte público como “el número máximo de *personas* que pueden ser transportadas pasando una ubicación dada durante un periodo de tiempo dado bajo condiciones de operación específicas; sin demoras, peligros, o restricciones, y con un nivel certeza razonable”. Esta medida se expresa en número de pasajeros por hora.

4.2. TRANSMILENIO

| Tramo | Velocidad (km/h) |
|--------------------|----------------------------|
| Eje Ambiental (EO) | 9,07 |
| Eje Ambiental (OE) | 10,51 |
| Caracas (SN) | 22,05 |
| Caracas (NS) | 22,61 |
| Caracas Sur (NS) | 24,82 |
| Suba (SN) | 24,95 |
| Suba (NS) | 25,08 |
| Calle 8o (OE) | 26,59 |
| NQS Sur (NS) | 27,32 |
| Caracas Sur (SN) | 28,17 |
| Américas (EO) | 28,24 |
| Américas (OE) | 28,37 |
| Calle 8o (EO) | 29,27 |
| Autonorte (NS) | 31,21 |
| NQS Central (NS) | 32,80 |
| Autonorte (SN) | 33,12 |
| NQS Sur (EO) | 33,18 |
| NQS Central (SN) | 36,87 |

TABLA 4.2 – Velocidades medias de los distintos corredores en el año 2007 (Steer Davies Gleave, 2007).

Hinebaugh (2009) establece que la capacidad de un sistema BRT está limitada por el componente que menos capacidad tenga (en otras palabras, el cuello de botella). Los tres componentes clave para los sistemas BRT son los autobuses, cuya capacidad está medida en personas, las estaciones, cuya capacidad está medida en personas y autobuses, y los corredores, cuya capacidad está medida en autobuses. Cualquiera de estos elementos que tenga la menor capacidad va a convertirse en el factor que controla al corredor del sistema. Varios autores coinciden en que la mayoría de los casos, la capacidad de los sistemas BRT está limitada por las estaciones (Cain *et al.* 2006; Steer Davies Gleave, 2007; Wright & Hook, 2007).

4.2.5.1 Capacidad de los autobuses

Como ya se mencionó anteriormente, TransMilenio cuenta con dos tipos de autobuses para la operación dentro de los corredores troncales, los autobuses articulados y los autobuses biarticulados. Los autobuses articulados pueden cargar hasta 160 pasajeros, tienen un tiempo de parada de 13 segundos y un tiempo de abordaje promedio por pasajero de 0,3 segundos. Por otra parte, los autobuses biarticulados tienen capacidad de 240 pasajeros, un tiempo de parada de 14 segundos y un tiempo de abordaje promedio por pasajero de 0,3 segundos.

| Línea | Tipo | Demanda (pasajeros/hora/sentido) |
|--------------------------------|--------------|-------------------------------------|
| Metro de Hong Kong | Metro | 80.000 |
| Línea 1 de São Paulo | Metro | 60.000 |
| Línea B de Ciudad de México | Metro | 39.300 |
| La Moneda de Santiago de Chile | Metro | 36.000 |
| Línea Victoria de Londres | Metro | 25.000 |
| Línea 6 del Metro de Madrid | Metro | 21.000 |
| Línea D de Buenos Aires | Metro | 20.000 |
| TransMilenio en Bogotá | BRT | 45.000 |
| 9 de julho de São Paulo | BRT | 34.910 |
| Assis Brasil de Porto Alegre | BRT | 28.000 |
| Eixo Sul de Curitiba | BRT | 10.640 |
| MRT-3 de Manila | Riel elevado | 26.000 |
| SkyTrain de Bangkok | Riel elevado | 22.000 |
| Monoriel de Kuala Lumpur | Monoriel | 3.000 |
| Túnez | LRT | 13.400 |

TABLA 4.3 – Capacidad máxima real de algunos sistemas de transporte masivo alrededor del mundo (Wright & Hook, 2007; Steer Davies Gleave, 2007).

Para el año 2006, los autobuses articulados transportaban diariamente un promedio de 1.596 pasajeros, lo cual equivale a cinco veces más que el promedio de pasajeros que transportan los autobuses tradicionales. Además, el número de kilómetros que recorre cada autobús ha venido en aumento debido a la expansión de los corredores del sistema, la ampliación de horarios y el incremento del número de servicios express. Para este mismo año, cada autobús recorría diariamente 370 kilómetros (Cain *et al.* 2006).

Para ilustrar mejor las capacidades que pueden alcanzar estos autobuses, en la Tabla 4.4 se muestra la cantidad de pasajeros que puede transportar cada tipo de vehículo en un corredor de un solo carril y con estaciones con una sola plataforma de abordaje (también llamada bahía de paradas). TransMilenio incrementa la capacidad del sistema utilizando bahías múltiples de parada en cada estación (Wright & Hook, 2007).

| Tipo de vehículo | Máxima capacidad del vehículo (pasajeros) | Tiempo de espera promedio (segundos) | Tiempo promedio de abordaje y salida (segundos) | Capacidad del corredor (pphpd) | Capacidad de vehículos (vehículos/hora) |
|------------------|--|---|--|-----------------------------------|--|
| Articulado | 160 | 13 | 0,3 | 9.779 | 61 |
| Biarticulado | 240 | 14 | 0,3 | 12.169 | 51 |

TABLA 4.4 – Efectos de la interfaz vehículo-plataforma y el tamaño del vehículo en la capacidad (Wright & Hook, 2007).

4.2.5.2 Capacidad de las estaciones

TransMilenio fue el primer sistema BRT en incluir múltiples plataformas de abordaje dentro de cada estación, esto le permitió alcanzar capacidades que anteriormente solo tenían los sistemas de metro pesados (Wright & Hook, 2007). Algunas estaciones de TransMilenio pueden tener hasta cinco plataformas distintas, en donde cada plataforma se usa para una ruta diferente.

Wright y Hook (2007) establecen que hay dos propósitos en la inclusión de múltiples plataformas en una estación. El primero de ellos consiste en ofrecer distintos tipos de servicios, tales como los corrientes y los express. Éstos se pueden ubicar en distintas plataformas. El segundo, y más importante, es reducir los niveles de saturación en las estaciones. Ésto contribuye a mejorar el servicio.

Además, es posible distribuir las distintas rutas a lo largo de cada plataforma, de forma que cada ruta pertenezca a una sola plataforma. Esto facilita al usuario la búsqueda de rutas, ya que asociará cada ruta con una plataforma.

En teoría, una estación con cinco plataformas puede tener hasta cinco veces más capacidad que una estación que solamente tiene una plataforma (Wright & Hook, 2007). Para que esto ocurra, se deben alcanzar niveles de saturación de las plataformas entre el 40% y el 60%. El estudio de capacidad de TransMilenio para el año 2007 (Steer Davies Gleave, 2007) revela cuáles son estos valores y las capacidades que pueden alcanzar las estaciones de acuerdo al número de bahías que tengan. En la Tabla 4.5 se muestra la capacidad que pueden alcanzar las estaciones de acuerdo al número de bahías, y si cada bahía tiene espacio o no para tener vehículos en cola (espacio de almacenamiento).

| Tipo de estación | Saturación recomendada (%) | Capacidad (vehículos/hora) |
|--|----------------------------|----------------------------|
| Estación con un solo punto de parada sin espacio para esperar en cola otros autobuses | 40 | 48 |
| Estación con un solo punto de parada con espacios para esperar en cola otros autobuses | 60 | 72 |
| Estación con dos puntos de parada sin espacios para esperar en cola otros autobuses | 40 y 40 | 96=48+48 |
| Estación con dos puntos de parada, uno con espacio para esperar en cola otros autobuses y otro sin disponibilidad para esperar en cola otros autobuses | 40 y 60 | 120=48+72 |
| Estación con dos puntos de parada con espacio para esperar en cola otros autobuses | 60 y 60 | 144=72+72 |
| Estación con tres puntos de parada de los cuales solo uno tiene espacio para esperar en cola otros autobuses | 40, 60 y 60 | 192=48+72+72 |
| Estación con tres puntos de parada con espacio para esperar en cola otros autobuses en cada uno | 60, 60 y 60 | 216=72+72+72 |
| Estación con cuatro puntos de parada todos con espacio para esperar en cola otros autobuses y sin tiempo de regulación | 60, 60, 60 y 60 | 288=72+72+72+72 |

TABLA 4.5 – Capacidad de las estaciones de acuerdo al número de plataformas (Steer Davies Gleave, 2007).

4.2.5.3 Capacidad de los corredores

La capacidad de los corredores en los sistemas BRT suele ser mucho mayor que la capacidad de las estaciones. Se han hecho diversos estudios para medirla. El manual de planeación y diseño para la administración del tránsito y transporte elaborado por la Alcaldía Mayor de Bogotá (Guzmán *et al.* 2005) establece que el flujo de saturación de los corredores se alcanza cuando hay entre 692 y 750 autobuses articulados por hora por carril. Cuando hay giros a la derecha, el intervalo está entre 470 y 730, y para los giros hacia la izquierda está entre 465 y 735. Se debe notar que esta capacidad no contempla elementos como intersecciones y semáforos. Se puede ver claramente que la capacidad de los corredores es muy superior a la de las estaciones.

Steer Davies Gleave (2007) establece que la *capacidad básica* de cada corredor es igual a la de la estación con menor capacidad a lo largo del corredor. La capacidad básica no tiene en cuenta factores que puedan aumentar el desempeño dentro del sistema, tales como rutas express. A continuación se muestran los valores obtenidos para los distintos corredores (Steer Davies Gleave, 2007). Esta lista no incluye los corredores de la calle 26 ni la carrera décima, ya que fueron inaugurados después de la fecha de este estudio.

- **A** Troncal Caracas Centro: 192 autobuses/hora
- **B** Troncal Autopista Norte: 144 autobuses/hora
- **C** Troncal Avenida Suba: 144 autobuses/hora
- **D** Troncal Calle 80: 48 autobuses/hora
- **E G** Troncal NQS: 72 autobuses/hora
- **F** Troncal Américas/Calle 13: 144 autobuses/hora
- **J** Troncal Eje Ambiental: 72 autobuses/hora
- **H** Troncal Caracas Sur: 96 autobuses/hora
- **H** Troncal Caracas Sur ramal Tunal: 72 autobuses/hora

En el mismo estudio (Steer Davies Gleave, 2007) se analizaron las intersecciones de cada corredor para encontrar en cada caso cuál limitaba la capacidad del mismo. Se recolectaron los datos de la relación entre el tiempo en que los semáforos están en verde para el corredor de TransMilenio y el tiempo total de cada ciclo. Los resultados de este análisis se pueden ver en la Tabla 4.6.

4.2.6 Demanda

En Diciembre de 2012 TransMilenio transportó diariamente a 1.788.740 pasajeros en rutas troncales (TransMilenio, 2013a), una cifra que viene aumentando en los últimos cinco años a una tasa del 4,7% por año. De estos pasajeros 1.756.517 corresponden a la infraestructura troncal de las dos primeras fases de TransMilenio y 32.223 a la infraestructura de la tercera fase que fue inaugurada el 30 de Junio de 2012 (Noticias Uno, 2012). Se estima que la capacidad para las dos primeras fases de TransMilenio es de 2 millones de pasajeros al día (Observatorio de Movilidad, 2011), lo cual indica para los corredores pertenecientes a estas dos fases que están alcanzando su capacidad máxima.

4.2. TRANSMILENIO

| Troncal | Intersección | Relación g/c | Capacidad para el acceso correspondiente a Transmilenio (vehículos/hora/sentido) |
|---------|-------------------------------|--------------|--|
| A | Caracas con Calle 76 | 60/120 | 498 |
| H | Caracas con Villavicencio | 60/120 | 498 |
| A B | Autopista Norte con Calle 82 | 40/120 | 332 |
| A | Caracas con Jiménez (directo) | 45/120 | 374 |
| A | Jiménez con Caracas (directo) | 25/120 | 208 |
| A F J | Caracas x Jiménez (giros) | 20/120 | 136 |
| G | NQS X Calle 8 sur | 55/120 | 457 |
| F | Calle 13 x Puente Aranda | 75/120 | 623 |
| C | Suba X Calle 100 | 25/120 | 208 |
| D | Acceso a portal Calle 80 | 20/120 | 136 |
| F | Cali X Américas | 20/120 | 166 |

TABLA 4.6 – Capacidad de las intersecciones críticas en las troncales (Steer Davies Gleave, 2007).

Como se puede ver en la Figura 4.4 los niveles de demanda se mantienen casi constantes a lo largo de los días laborables y se ve una disminución para los fines de semana, particularmente para el domingo. Por esta razón hay rutas especiales para los domingos y días festivos, en los que el comportamiento de la demanda es totalmente distinto a los demás días.

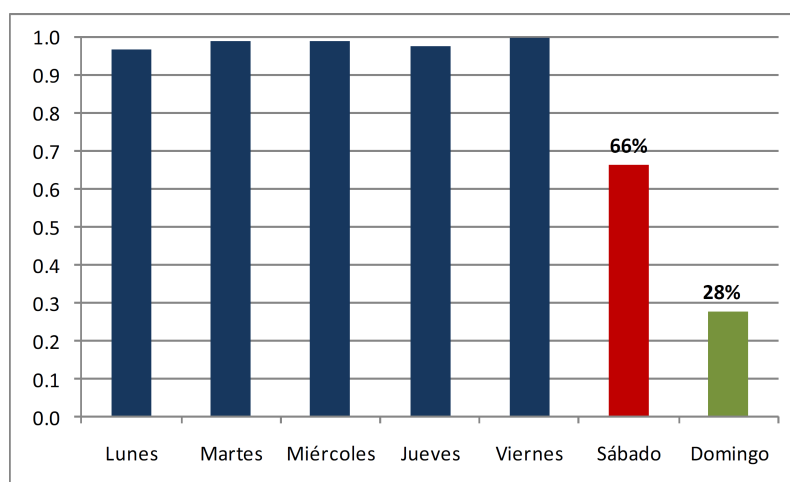


FIGURA 4.4 – Distribución de la demanda a lo largo de la semana (Concha, 2011).

A lo largo del día la demanda también cambia. La distribución de la demanda

está impulsada por la jornada laboral y escolar. Observatorio de Movilidad (2011) ofrece una gráfica que ilustra claramente cuál es la distribución de la demanda a lo largo de un día típico laborable. Esta gráfica, que compara los años 2008, 2009 y 2010, se puede ver en la Figura 4.5.

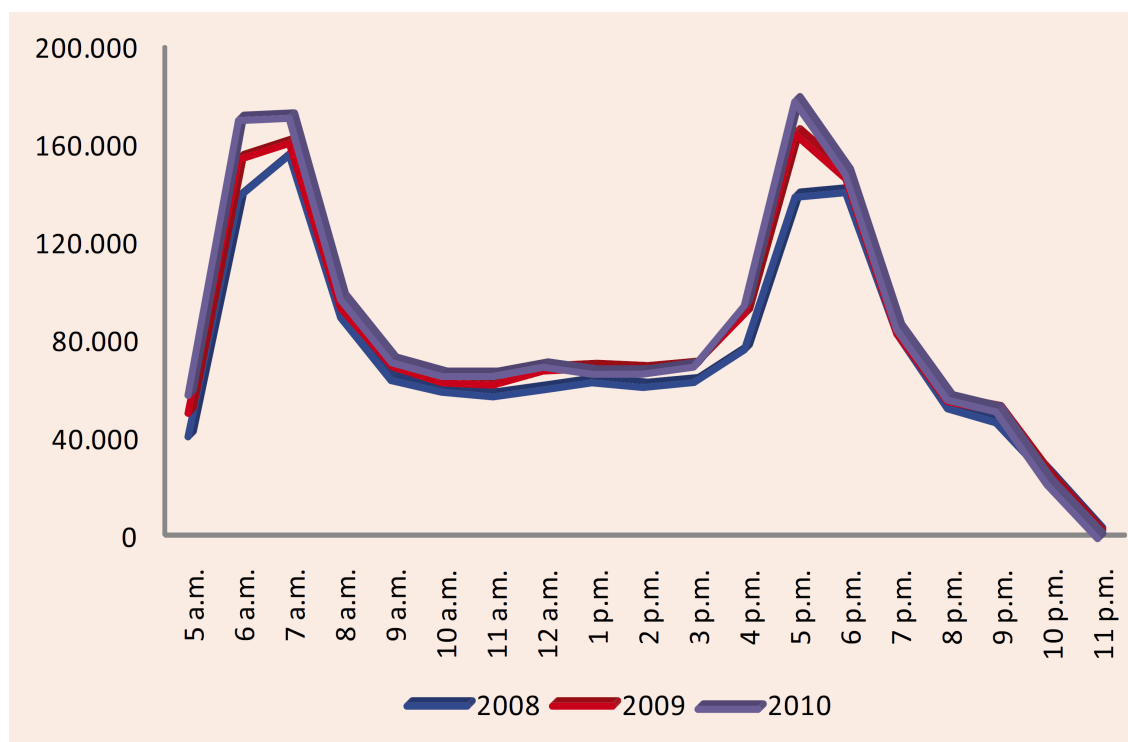


FIGURA 4.5 – Distribución de la demanda a lo largo del día (Observatorio de Movilidad, 2011).

4.2.6.1 Demanda en hora punta

La hora punta del sistema es la franja horaria en la que el sistema tiene más demanda. En Bogotá esta punta de demanda se presenta dos veces al día y coincide con las horas de inicio y fin de la jornada laboral. Para el año 2010 la demanda en las horas punta constituyó el 21 % de la totalidad de los viajes (Observatorio de Movilidad, 2011).

Actualmente, TransMilenio presenta problemas de congestión en las estaciones durante las horas punta, en este lapso de tiempo se movilizan 199.934 pasajeros (TransMilenio, 2013a), lo que conlleva la saturación del sistema. Para el año 2010 el promedio de ocupación de los autobuses en el sentido más cargado en hora punta fue del 98,47%. En la Figura 4.6 se ven los niveles de demanda para los corredores de la fase I y II en los últimos 5 años, en los cuales se presenta una tasa de crecimiento promedio del 6% (TransMilenio, 2013a).

4.2. TRANSMILENIO

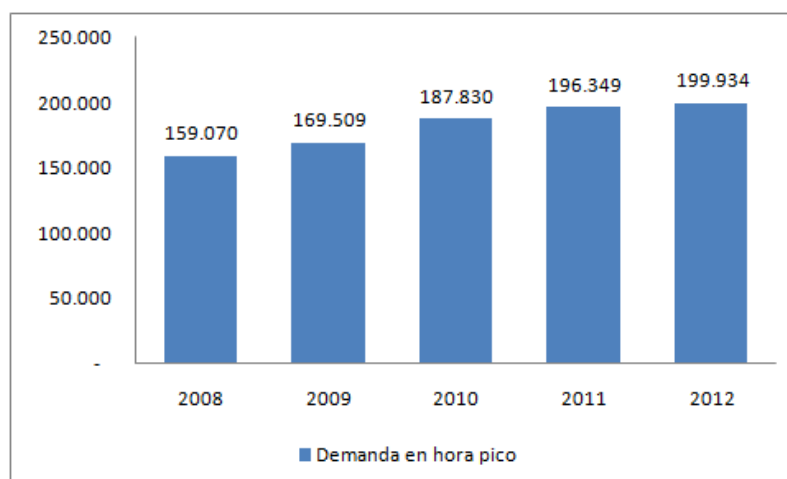


FIGURA 4.6 – Demanda de pasajeros para la hora punta de corredores de Fase I y II (TransMilenio, 2013a).

4.2.6.2 Demanda en estaciones

La alta demanda en las estaciones puede sobrepasar la capacidad de pasajeros de las mismas ocasionando que se generen colas de usuarios intentando entrar al sistema. En la Figura 4.7 se muestra la cantidad de pasajeros que entran y salen de las principales estaciones del sistema.

De acuerdo al estudio de capacidad del sistema para el año 2012 hay diversas estaciones que debido a la demanda de pasajeros han alcanzado niveles de saturación críticos (con probabilidad de 1 de que se forme una cola) o han llegado a su límite (con probabilidad de 0.7 o mayor de que se forme una cola). Este estudio analizó la situación de las estaciones que se encuentran sobre las troncales Autonorte, Caracas y Caracas Sur.

Las estaciones críticas son: Toberín, Calle 146, Calle 142, Prado, Calle 127, Pepe Sierra, Calle 106, Calle 100, Virrey, Héroes, Calle 76, Calle 72, Flores, Calle 63, Marly, Calle 45 y Profamilia.

Las estaciones al límite son: Mazurén, Calle 85, Avenida 39, Calle 26, Calle 19, Avenida Jiménez y Olaya.

Con respecto a la capacidad de autobuses de las estaciones también se han adelantado estudios. Concha (2010) identifica la capacidad remanente de todas las estaciones del sistema. De este estudio se identifican las siguientes estaciones con capacidad menor a la demanda requerida. Estas son: Biblioteca Tintal, Calle 146, Polo y General Santander.

4.2.7 Tarificación

A la fecha de elaboración de este documento TransMilenio tiene dos tarifas. Una tarifa para las horas punta, en donde el sistema se encuentra más congestionado,

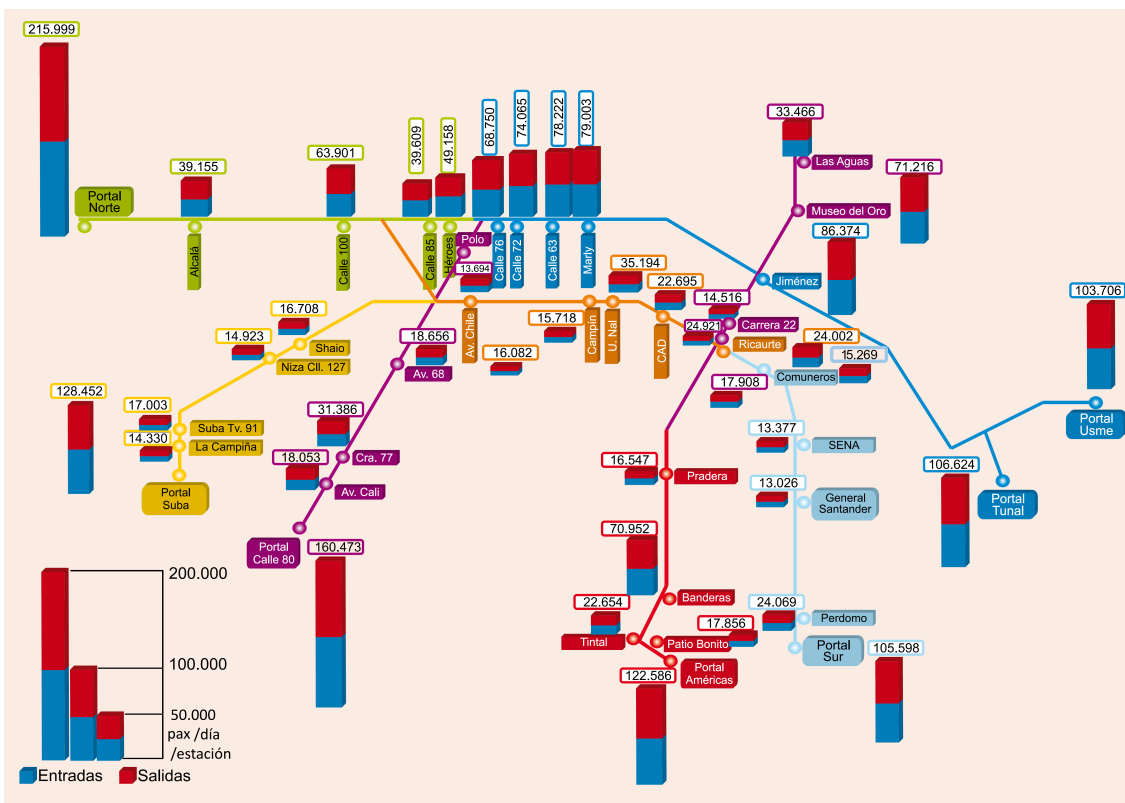


FIGURA 4.7 – Demanda de pasajeros para las principales estaciones de TransMilenio (Observatorio de Movilidad, 2011).

y otra tarifa para las horas valle (El Tiempo, 2012):

- **Tarifa horas punta:** 1.700 pesos colombianos (0,94 USD). Esta tarifa rige de las 5:30 am hasta las 8:30 am y de las 3:00 pm hasta las 7:30 pm de lunes a sábado.
- **Tarifa horas valle:** 1.400 pesos colombianos (0,77 USD). Esta tarifa rige en el resto de horarios y durante los días domingos y festivos.

La discriminación de estas tarifas se hace para estimular los viajes en horas valle y poder así distribuir la demanda a lo largo del día de forma que el sistema no se sature en las horas punta.

4.2.8 Aspectos y estrategias que incrementan la capacidad de TransMilenio

Como se pudo ver en la Sección 4.2.5, TransMilenio tiene una capacidad real de carga de 45.000 pphpd, la cual sobrepasa por mucho a la de los sistemas BRT anteriores. Este nivel de capacidad se logra gracias a varios aspectos (Wright & Hook, 2007), que son:

- La existencia de carriles con sobrepaso en las estaciones.
- La existencia de múltiples bahías de paradas en cada estación.

4.2. TRANSMILENIO

- El corto tiempo de paradas en las estaciones. Este es posible gracias a varios factores, tales como que los autobuses tienen múltiples puertas de acceso, hay plataformas a nivel para que los viajeros lo puedan abordar y que el cobro de la tarifa se hace a la entrada de las estaciones y no en el autobús.
- La existencia de varios tipos de servicios. Actualmente, TransMilenio cuenta con tres tipos de servicios troncales, los servicios corrientes o ruta fácil que paran en todas las estaciones, los servicios express que paran en la mitad de las estaciones y los servicios súper-express que paran en el 20% de las estaciones.
- Autobuses con alta capacidad. Los articulados cuentan con una capacidad de 160 pasajeros y los biarticulados para 240.
- Alta frecuencia en las rutas. Muchas rutas tienen frecuencias de tres minutos que se incrementan hasta un autobús por minuto en horas punta.

Además de las características anteriores, se han implementado nuevas estrategias para aumentar la capacidad y luchar contra los niveles de saturación que se presentan durante las horas punta.

4.2.8.1 Conexiones entre troncales

Las conexiones entre troncales son una de las ventajas que ofrecen los sistemas BRT y que le dan mucha flexibilidad. Éstas consisten en conexiones físicas entre los corredores para que los autobuses puedan pasar de una troncal a otra. De esta forma, las rutas pueden ser diseñadas para adaptarse a la demanda tratando de cubrir los pares de origen-destino más demandados en todo el sistema, independientemente de si el origen está en una troncal distinta a la del destino. Esta estrategia reduce el número de transbordos e impacta positivamente sobre el tiempo de viaje de los usuarios. Además, reduce los niveles de congestión en las estaciones (Concha, 2011).

4.2.8.2 Retornos operacionales

Los retornos operacionales son puntos de retorno a lo largo de los corredores troncales en los cuales los autobuses pueden retornar al punto de donde partieron. Su objetivo principal es atender la carga crítica de servicios largos que consumen una gran cantidad de autobuses (Concha, 2010). Son particularmente útiles para satisfacer la demanda que solo se presenta en ciertos sectores de un corredor, de esta forma se envía una ruta que cubra este sector y no es necesario que la ruta continúe hasta el final del corredor. Estos retornos operacionales le dan mucha flexibilidad al sistema. La inclusión de retornos operacionales a un sistema BRT tiene las siguientes ventajas (Steer Davies Gleave, 2012):

- Permiten ajustarse a las condiciones de demanda.
- Permiten mejorar la frecuencia de las rutas en segmentos cortos. Se diseña una frecuencia para el segmento corto que va a recorrer la ruta. Esto ayuda a mejorar la regularidad, ya que para segmentos muy largos los tiempos de llegada de los autobuses tienden a ser irregulares.

- Ayudan a reducir el número de recorridos ociosos, es decir, el número de kilómetros en que un autobús va con una carga de pasajeros baja.
- Ayudan a reducir la congestión de vehículos en las estaciones, ya que se elimina la circulación de autobuses en tramos innecesarios.
- Sirven de ayuda para la atención de situaciones de contingencia operacional.

Actualmente existen 17 retornos operacionales a lo largo de las troncales de TransMilenio, y está proyectada la construcción de 3 retornos más (Concha, 2010), tal y como lo ilustra la Figura 4.8.

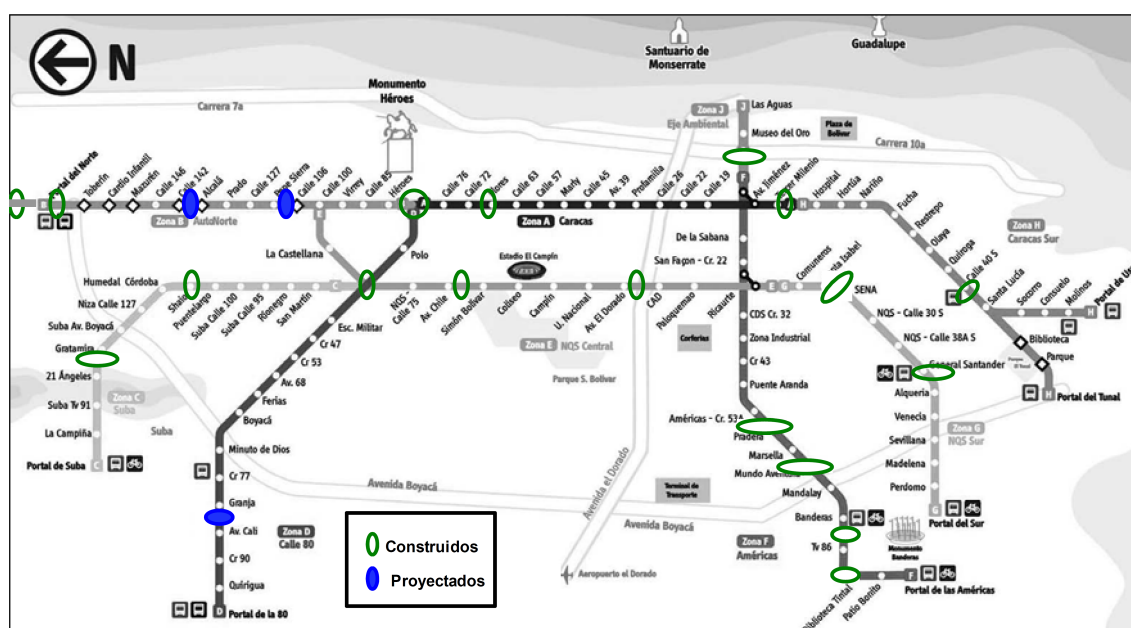


FIGURA 4.8 – Mapa de retornos operacionales de TransMilenio (Concha, 2010).

4.2.8.3 Convoys

Los convoys son otra estrategia que se han utilizado para aumentar la capacidad del sistema y disminuir la congestión de vehículos en las estaciones. Consiste en enviar dos autobuses al mismo tiempo (Steer Davies Gleave, 2007). Éstos tienen una capacidad de 320 pasajeros ya que están compuestos de dos autobuses articulados. Se comportan como si fuera un metro con dos vagones y se obtienen velocidades comerciales similares (Lillo *et al.* 2003). El problema con los convoys es que tienden a desintegrarse parcialmente, lo cual disminuye su capacidad. De esta forma un convoy de cuatro autobuses tiene tan solo el doble de la capacidad de un autobús (Lillo *et al.* 2003).

PROPUESTAS Y METODOLOGÍAS EN SISTEMAS BRT: ESTADO DEL ARTE

DESPUÉS DE REALIZAR varias búsquedas en las bases de datos de artículos científicos se encontró que son pocas las propuestas que buscan optimizar los sistemas BRT desde un punto de vista operacional. Esto puede explicarse por el hecho de que los sistemas BRT son relativamente recientes, y como se pudo ver en la Figura 3.1, hasta antes del año 2000 solo había 33 ciudades en el mundo que contaban con este tipo de sistemas. Otra razón atribuible al hecho de que haya pocas propuestas de optimización es que muchos de los sistemas que existen actualmente están lejos de alcanzar su capacidad máxima. Por ejemplo, Hinebaugh (2009) menciona que la capacidad no ha sido un problema para ninguno de los sistemas BRT que operan en Estados Unidos, ninguno opera a su máxima capacidad y tienen espacio para expandir su capacidad de operación.

Viendo el panorama anterior no es sorprendente que haya pocas publicaciones en el tema. Sin embargo, existen propuestas muy interesantes que sirven como punto de partida para proponer un modelo que permita aumentar la capacidad de los sistemas BRT. Hasta la fecha no se ha encontrado una propuesta que permita realizar un diseño automatizado de rutas, lo más cercano que se ha encontrado han sido modelos que reciban varias propuestas de rutas y escojan las mejores.

A continuación, se presenta una descripción de las propuestas encontradas, que han sido agrupadas en propuestas de optimización de sistemas BRT, en general, y más concretamente en propuestas para el sistema TransMilenio.

5.1 PROPUESTAS DE OPTIMIZACIÓN DE SISTEMAS BRT

En esta sección se muestran las propuestas para optimizar los sistemas BRT distintos a TransMilenio. Se describen en detalle las basadas en la programación

de rutas y se mencionan otras que buscan optimizar los sistemas BRT desde otras perspectivas, como la priorización de señales de tránsito. La mayoría de propuestas se centran en optimizar los sistemas BRT variando los tiempos que hay entre las partidas de los autobuses (también llamados *headways*) de las distintas rutas.

5.1.1 Propuestas basadas en la programación de rutas

En Sun *et al.* (2008) se propone un modelo para optimizar un sistema BRT en base a dos variables; el *headway*, el cual se asume que es uniforme, y el orden de rutas que se le asigna a cada autobús.

El modelo de optimización propuesto se caracteriza porque existe un conjunto de rutas predefinidas (normalmente son 3 rutas: una corriente, una zonal y otra express). Teniendo este conjunto se toma un número al azar para representar los tiempos de partida entre autobuses. El algoritmo se encarga de encontrar una combinación óptima de rutas que minimizan una función objetivo. Por ejemplo, el algoritmo puede determinar que para un *headway* de 5 minutos la mejor configuración de rutas es [corriente, express, express, corriente, zonal]. La solución anterior quiere decir que en el minuto 0 parte un autobús que hace el recorrido de la ruta corriente, en el minuto 5 parte un autobús que hace el recorrido de la ruta express, en el 10 uno de la ruta express, en el 15 uno de la ruta corriente y en el 20 uno de la ruta zonal. Esta solución puede ser mejor que por ejemplo [express, express, zonal, zonal, express].

La función a minimizar está compuesta por el tiempo de espera de los pasajeros en las estaciones, el coste del tiempo de espera de los pasajeros dentro del autobús y el coste de operación de los vehículos. El modelo para la función objetivo es muy completo y presenta numerosas variables, tales como: el número de pasajeros que sube o baja de cada autobús por estación, las paradas de cada ruta, el valor de los costes de espera de los pasajeros en la estación, dentro del autobús, el coste de operación de los vehículos, entre otros.

Las rutas están dadas, y son un parámetro del modelo, al igual que el volumen de pasajeros y la distancia entre las estaciones, por lo que este modelo realmente no diseña rutas por sí solo. Sólo elige una frecuencia de partida de las rutas y “baraja” entre las distintas rutas.

Para encontrar una solución óptima al problema se hace uso de un algoritmo genético. En el artículo se establece que la codificación es un elemento vital para el modelo e incluye una combinación de variables dentro de las cuales se destacan la frecuencia y el orden de partida de las rutas.

En Chen *et al.* (2012) se propone un modelo de optimización completo, con mucho nivel de granularidad, en el cual se detallan muy bien los costes. El coste total de una solución está dividido en el tiempo de espera del pasajero en la estación, el tiempo que el pasajero pasa dentro del vehículo y el coste de operación del vehículo. Los dos primeros corresponden al tiempo que el pasajero pasa dentro del sistema. Se excluye el tiempo que le lleva al usuario caminar hacia el sistema, ya que la programación de rutas y la variación de las frecuencias no tiene ningún efecto sobre este tiempo.

El modelo tiene en cuenta variables como la frecuencia de salida de los autobuses, distancias entre estaciones, velocidad promedio entre estaciones, tasas y tiempos de abordaje, tiempos de aceleración y desaceleración, número de semáforos entre estaciones, tiempos de ciclo de semáforos, entre otras. Además, se asume que el tiempo de espera es igual a la mitad del tiempo de frecuencia.

Para calcular los costes de operación sólo se toma en cuenta los costes variables y no los fijos, en otras palabras se toman en cuenta los costes que puedan verse impactados por la programación de las rutas y frecuencias. Dentro de estos costes se encuentran: el coste de operación por kilómetro, las horas de operación, la depreciación de los vehículos, entre otros.

Las variables de decisión para el modelo de optimización son las frecuencias de los autobuses y las variables binarias que representan si se debe saltar una estación o no. El modelo busca minimizar los costes totales y está sujeto a restricciones de capacidad (mínima y máxima), disponibilidad de vehículos, limitaciones de frecuencia, entre otros. La restricción de capacidad mínima se impone para asegurarse de que los autobuses no circulen vacíos.

La complejidad del algoritmo es exponencial de acuerdo al número de estaciones o paradas. Por ello se recurre al uso de un algoritmo genético. Por otro lado, los algoritmos genéticos pueden representar de una forma natural las variables binarias, también permiten manejar fácilmente declaraciones basadas en procedimientos que son muy complejas y permiten incluir sentencias *if-else*.

Se hace un caso de prueba real en la línea 2 del sistema BRT de Pekín. Para determinar qué estaciones se deben saltar se calcula la proporción de la demanda. Si la proporción de la demanda es muy alta no se debe excluir esa estación de la ruta. Como resultado se evidencia una mejora del 5,9% comparada con un servicio optimizado sin rutas express y una mejora del 22,2% comparado contra el servicio actual.

En Leiva *et al.* (2010), Larrain *et al.* (2010a, 2010b) se presenta un modelo de optimización para minimizar los costes de tiempo de espera de los pasajeros, tiempo de viaje y costes de operación, a los cuales llaman costes sociales, para un servicio de autobuses express asumiendo que se conoce la demanda. Se formula un problema de programación matemático que determina el mínimo coste social dados el conjunto de estaciones, la distancia entre estaciones, la matriz de origen-destino con la demanda de los pasajeros y un conjunto de rutas que aparentan ser atractivas *a priori*. Para cada ruta sugerida el modelo devolverá las frecuencias de servicio y el tamaño de los autobuses a usar.

Para la construcción de este modelo se asume que la demanda es fija y es conocida, y está definida por una matriz origen-destino entre las estaciones, la cual debe satisfacerse. También se asume que la llegada de los pasajeros a las estaciones ocurre a una tasa constante promedio que está dada por la matriz. Para los usuarios se asume que estos elegirán la mejor opción de rutas para llegar a su destino que minimice su tiempo de viaje. Finalmente, se asume que no hay límites en el tamaño de la flota disponible.

El coste de operación se calcula en base al coste por ciclo para una línea, la

frecuencia sobre cada línea y el conjunto de líneas sobre las que se opera. Los costes de usuario están dados por el tiempo de acceso, el tiempo de espera, el tiempo dentro del vehículo y el tiempo de transbordo.

Se expone el caso de aplicación que se realiza en la Avenida Pajaritos del sistema Transantiago de la ciudad de Santiago de Chile, del cual se cuenta con la matriz origen-destino y 23 propuestas de rutas predefinidas. Se asume que las llegadas de los autobuses en el sistema siguen un proceso de Poisson. Además, se asignan unos costes de espera en las estaciones para cada usuario, costes de tiempo de viaje (espera dentro del vehículo) y unos costes de penalización por transbordo. Los resultados muestran una mejora de 13,9% por la inclusión de líneas express en el sistema.

Vale la pena mencionar que en Leiva *et al.* (2010) no se propone ni se implementa ningún algoritmo, el modelo se implementa en el lenguaje de programación de optimización AMPL y se resuelve utilizando un software comercial.

5.1.2 Otras propuestas

Dong *et al.* (2011) introducen un esquema para la programación de rutas que se basa en la densidad de pasajeros en el interior de las estaciones. A través de cámaras de video se detecta la densidad de pasajeros dentro de cada estación y con esta información se determina la frecuencia que deben tener los autobuses y si además se deben enviar rutas express que ayuden a aliviar la congestión dentro de las estaciones. En este artículo se definen niveles de congestión dentro de las estaciones y basándose en esos niveles se cambia la frecuencia de los autobuses.

También existen diversas propuestas para mejorar la operación de los sistemas BRT mediante la priorización de señales de tránsito. Ma y Yang (2007) describen la relación matemática que hay entre la frecuencia de partida de una ruta de autobús, la longitud de ciclo de las intersecciones semaforizadas y el número de estados de señales diferentes cuando los autobuses llegan a la intersección. Basado en esto, presenta diversas estrategias para el control prioritario de señales en los diferentes números de estados de las mismas. Las estrategias propuestas logran disminuir la desviación en los tiempos de *headway*, es decir, logra disminuir la desviación de la puntualidad de los autobuses, sin tener un impacto significativo en el retraso del tráfico mixto.

Otras propuestas que estudian el control prioritario de señales en los sistemas BRT se pueden encontrar en Wang y Zhu (2012), Yong *et al.* (2008), Cao *et al.* (2009), Xu *et al.* (2010). Wang y Zhu (2012) proponen un enfoque de señales prioritarias para sistemas BRT en tiempo real, el cual funciona a través de la extensión en dos etapas de los tiempos en los que el semáforo se encuentra en verde. Yong *et al.* (2008) analizan los tiempos de las fases de las señales de tránsito y propone un diseño para el control de la red vial en las intersecciones semaforizadas que se basa en las señales que envían los autobuses cuando están a punto de llegar a las intersecciones. Cao *et al.* (2009) proponen una estrategia de señales de tráfico prioritarias que se basa no solamente en detectar si un autobús va a pasar por una intersección sino que también tiene en cuenta las condiciones de tráfico de

los otros vehículos. Xu *et al.* (2010) proponen un nuevo conjunto de reglas para la respuesta de solicitudes de cambio de señales por parte de los autobuses, este conjunto de reglas se encarga de resolver dinámicamente los conflictos entre las fases de los vehículos y de los autobuses BRT.

5.2 PROPUESTAS DE OPTIMIZACIÓN DE TRANSMILENIO

Desde que TransMilenio entró en operación en el año 2000 se han hecho propuestas para optimizar su operación. La mayoría de estas propuestas están enfocadas a la reducción de costes del sistema, buscando un equilibrio entre los tiempos de espera de los pasajeros, y los costes de operación.

López *et al.* (2011) proponen modelar el sistema de TransMilenio utilizando *redes de Petri*. El modelo propuesto se clasifica como un modelo de simulación determinístico macroscópico debido a su nivel de detalle, representación del proceso y operación. El modelo utiliza una aproximación multiagente para modelar tres componentes importantes del sistema: el comportamiento de la gente (cuánta gente toma el autobús en un hora), las dinámicas de los corredores (el tiempo que transcurre y la distancia entre las estaciones) y la interacción entre los pasajeros y el autobús. Debido a que las redes de Petri básicas no sirven para hacer estudios relacionados con tiempo, se agregan tiempos de disparo a los nodos para poder representar las relaciones temporales.

Se modelan tres corredores que son el de la Avenida Carcas, Autornore y el de las Américas. De estos corredores se tienen en cuenta las 7 estaciones más importantes de las 45 disponibles. Se escogieron además 3 rutas que paran en las mismas estaciones en los trayectos de ida y vuelta, una ruta corriente o ruta fácil, una express y una súper-express.

Se diseñan dos redes de Petri, una que modela todo el sistema y va asignando de manera aleatoria autobuses a rutas, y otra que separa las rutas de los autobuses. El modelo aleatorio tiene la ventaja de poder simular la interacción que hay entre rutas. En el modelo no aleatorio esto no sucede. El modelo aleatorio muestra mejor desempeño que el no aleatorio para suplir la demanda de los pasajeros con el menor número de recursos posible. Finalmente, el modelo aleatorio trabaja como un sistema integrado y es capaz de resolver una perturbación por sí mismo. Los resultados de esta simulación muestran que hay un punto en el que agregar más autobuses al sistema no mejora el desempeño del mismo.

En Duarte *et al.* (2008) se usa un *algoritmo genético* para encontrar la mejor frecuencia de rutas preestablecidas de autobuses que minimicen el tiempo de espera de los usuarios. La frecuencia se determina a través de la asignación de autobuses a cada ruta. La función objetivo intenta minimizar el tiempo que los pasajeros están dentro del sistema, compuesto por el tiempo de viaje más el tiempo de espera.

El cromosoma del algoritmo genético tiene tamaño igual al número de rutas y la población se inicializa de forma aleatoria con la restricción de que cada ruta tenga al menos asignado un autobús. Junto la población inicial también se crea

una matriz aleatoria que contiene los orígenes y destinos de todos los pasajeros, donde el número de pasajeros es un parámetro del algoritmo. En este algoritmo se da por hecho que el usuario es “inteligente” y siempre va a escoger la mejor ruta para ir a su destino.

La llegada de los autobuses a las estaciones se modela como un *proceso de Poisson*, donde la media de este proceso está dada por la frecuencia con la que parten los autobuses de los portales.

El tiempo de espera de los pasajeros se modela usando un *evento con distribución Erlang*. Se contempla el caso en que los autobuses estén llenos, para lo cual los usuarios deben esperar al siguiente autobús. Para medir el tiempo se diseñó un grafo con las rutas, donde cada nodo representa una estación y los arcos representan las conexiones existentes entre las estaciones. Los costes de los arcos definen el tiempo que se tarda entre las estaciones que el arco conecta. Adicionalmente, se incluyen arcos con las posibles rutas de los autobuses express, ya que estos no paran en todas las estaciones. Para la obtención de las rutas más cortas se utiliza el *algoritmo de Dijkstra* y se hace previo a la ejecución del algoritmo debido a que las rutas son invariables.

En Valbuena y Hidalgo (2005) se elabora un modelo para la evaluación de rutas de TransMilenio que se basa en los datos proporcionados por una matriz origen-destino. Partiendo de esta información se obtienen las probabilidades de viaje entre estaciones y la tasa de llegada de pasajeros a cada estación. Se asume que los usuarios conocen cuál es la ruta que les lleva menor tiempo para alcanzar su destino. Este modelo se implementa en un software comercial para simulación.

El modelo incluye una serie de restricciones para simplificar los cálculos. Estas restricciones son suposiciones en cuanto al comportamiento de los usuarios a la hora de elegir la o las rutas para llegar a su destino.

Los datos de entrada para el algoritmo de evaluación son los pares origen-destino, las paradas de cada servicio y los volúmenes de pasajeros asociados a cada par. También se requieren datos propios del sistema como las rutas existentes, la frecuencia de las mismas, la capacidad de los vehículos, la velocidad de cada servicio, la distancia entre las estaciones y otras características de la red.

El modelo está compuesto por tres módulos. El módulo de la red almacena información de la infraestructura física, como las estaciones, la distancia entre ellas, los corredores, entre otros. El módulo de las estaciones se encarga de manejar los ascensos y descensos en cada estación. El módulo de llegadas se encarga de asignar los orígenes y destinos a los pasajeros.

El cálculo del tiempo que el pasajero está dentro del sistema está dado por el tiempo de recorrido del autobús, el tiempo que el autobús permanece detenido y el tiempo de espera del pasajero. Se asume que el tiempo de llegada de los autobuses a las estaciones está distribuido uniformemente alrededor de la frecuencia de salida de los autobuses. Por lo tanto, el tiempo de espera de cada usuario por una ruta es igual a la mitad del tiempo de frecuencia de esa ruta.

5.3 ANÁLISIS DE LOS ESTUDIOS PREVIOS

Después de describir todas las propuestas relevantes enfocadas hacia la optimización de los sistemas BRT se procede a hacer un análisis de las mismas para tener un panorama claro de cuál es el estado actual de la tecnología.

5.3.1 Metodologías de solución

El modelo de Leiva *et al.* (2010) fue implementado usando el lenguaje AMPL y resuelto usando el software MINOS solver. Desafortunadamente, no dan detalles acerca de qué técnicas o algoritmos usan, ni mencionan la preferencia de un método en particular para encontrar soluciones. Debido a que los resultados obtenidos no garantizaban que se cumpliera la restricción de la capacidad de pasajeros de los autobuses, se diseñó una rutina para determinar qué rutas tienen problemas de capacidad, se elige la ruta que está congestionada y resuelve el modelo de nuevo imponiendo una restricción. De esta forma se van reduciendo los niveles de congestión hasta que no haya problemas de capacidad en ninguna de las rutas.

En Valbuena y Hidalgo (2005) se realizan simulaciones en las que se incluyen de nuevos conjuntos de rutas para evaluar cómo satisfacen estas rutas la demanda de viajes del sistema. Se utiliza una metodología heurística para encontrar los viajes origen-destino con mayores volúmenes de demanda, y se diseñan rutas que cubran estos viajes. El objetivo es diseñar rutas que puedan satisfacer la mayoría de los viajes usando la menor cantidad de pares origen-destino posibles, por lo que solo se tienen en cuenta el 12 % de los pares origen-destino con mayor demanda de TransMilenio, los cuales contienen cerca del 66 % de los viajes totales.

En Chen *et al.* (2012) se implementa un algoritmo genético para poder realizar la optimización en base a los *headways*. El algoritmo está implementado en Matlab, para lo cual han determinado varios parámetros clave. Existe una población de tamaño 20, una probabilidad de hacer cruce de 0.9, y una probabilidad de mutación de 0.007. También se le asigna al máximo número de generaciones un valor de 200. El algoritmo se detiene cuando ha alcanzado las 200 generaciones, o cuando durante 10 generaciones consecutivas se tiene el mismo valor para la función de costes, o la diferencia entre los costes totales entre dos generaciones es menor al 1 %.

En Duarte *et al.* (2008) se implementa un algoritmo genético para encontrar las frecuencias óptimas de partida de los autobuses. Codifican el algoritmo como un arreglo de longitud igual al número de rutas, y en cada posición almacenan información acerca de la programación de la ruta. Esta programación está compuesta por el número de autobuses asignado a una ruta, junto con la frecuencia de partida. La población se inicializa aleatoriamente, pero bajo la condición de que cada ruta tenga al menos un autobús asignado. Paralelamente también se inicializa la matriz origen-destino con la cantidad de viajes entre cada par. Solamente se utiliza un operador genético, el de mutación. Para mutar se elige un gen de forma aleatoria (de forma uniformemente distribuida) y se le asigna un número aleatorio

de autobuses a la ruta que el gen representa. Este número aleatorio pertenece al rango $[1, max]$, en donde max es un parámetro que permite controlar la variabilidad entre soluciones. En caso de que el número de autobuses asignados a todas las rutas sobrepase los existentes en el sistema, se elige otro gen de forma aleatoria y se le resta la cantidad de autobuses necesaria para no exceder los disponibles.

En Dong *et al.* (2011) se muestra un esquema de planificación de rutas que solamente necesita conocer el nivel de congestión de personas dentro de una estación, el cual puede determinarse a través de las cámaras de video que se encuentran en las estaciones. Este esquema está basado en la planificación original que opera el sistema BRT actualmente. Una vez se ha determinado el nivel de congestión dentro de las estaciones se establecen frecuencias de partida para cada una de las rutas que están directamente relacionadas con los niveles de congestión. Cuanto más altos sean estos, mayores son las frecuencias de partida de los autobuses. En resumen, Dong *et al.* (2011) proponen un esquema de planificación de frecuencias en tiempo real basado en los niveles de congestión de pasajeros en las estaciones, los cuales pueden ser obtenidos a través de las cámaras de video.

En Sun *et al.* (2008) se propone un algoritmo genético el cual cuenta con una codificación novedosa cuyo tamaño depende directamente del *headway* planificado en la operación. En este modelo el *headway* es para todas las rutas, y lo que se busca es determinar cuál es la mejor secuencia de rutas dado un *headway*. La codificación que se maneja es binaria, cada gen representa una ruta, y el orden en que aparecen los genes en el cromosoma representa el orden en que serán realizadas las rutas. La población inicial es generada de forma aleatoria, y se aplican los operadores genéticos de selección, cruce y mutación. Para el operador de selección se usa la técnica de la ruleta. De los operadores de cruce y mutación no se dan más detalles. No se sabe cuáles son las probabilidades de cruce y mutación, ni en qué punto del cromosoma se hace el corte para el cruce.

En la Tabla 5.2 se pueden ver las técnicas utilizadas en cada propuesta para resolver el problema de optimización de sistemas BRT.

5.3.2 *Análisis de los modelos propuestos*

La mayoría de modelos propuestos distan mucho de poder implementarse en un ambiente real, ya que no tienen el nivel de detalle suficiente para representar lo que sucede en el sistema BRT. A continuación, se describen las virtudes e inconvenientes que tiene cada modelo.

El modelo presentado en Duarte *et al.* (2008) tiene el inconveniente de que no tiene en cuenta los costes de operación de los autobuses, esto se ve reflejado en los resultados, en los cuales la mejor solución es aumentar mucho las frecuencias y se utiliza toda la flota. El modelo no representa correctamente las restricciones de capacidad que se tienen dentro de un sistema BRT, ya que no discrimina los niveles de congestión por estaciones, sino que lo hace por rutas, donde el nivel de congestión equivale a la suma de todos los pasajeros en cada estación de la ruta. Esto dista mucho de la realidad, en la cual puede haber estaciones muy concurridas y otras casi vacías. No se contemplan los transbordos, y esto está muy ligado al

hecho de que solamente se modeló una troncal (aunque esto no significa que lo implique, véase por ejemplo Leiva *et al.* (2010)). Tampoco se tienen en cuenta los tiempos de detención y arranque de los autobuses, ni los tiempos de abordaje y descenso de los pasajeros, ni los tiempos de detención en las intersecciones semaforizadas. Una ventaja que presenta esta propuesta es que construye un grafo que pre-calcula los tiempos de viaje entre cada par de estaciones para cada ruta, esto permite encontrar fácilmente la ruta óptima entre dos estaciones.

El modelo de López *et al.* (2011) tiene varios vacíos, tales como que no maneja costes de tiempo de espera ni de operación de los autobuses, no contempla los transbordos, no contempla la congestión de pasajeros dentro de las estaciones ni vehicular, no soporta velocidades discriminadas entre tramos y tampoco asigna distribuciones de tiempos de llegada para los pasajeros ni para los vehículos. Entre las ventajas que tiene está que contempla que cuando un autobús está lleno los pasajeros deben esperar al siguiente, el modelo es una herramienta gráfica de fácil comprensión, y puede modelar un sistema del cual no se conocen las ecuaciones pero sí su comportamiento; estas dos últimas ventajas son atribuibles al hecho de que el sistema ha sido modelado usando redes de Petri.

El modelo de Valbuena y Hidalgo (2005) menciona algunas restricciones importantes pero no proporciona ninguna en su modelo. Otras restricciones que incluye a manera de suposiciones pueden no corresponder con la realidad. Por ejemplo, asumen que si un pasajero va a realizar un viaje de cinco estaciones de longitud, éste solo tomará servicios corrientes. Tampoco tiene en cuenta los tiempos de detención y arranque de los autobuses, ni los tiempos de abordaje y descenso de los pasajeros, ni los tiempos de detención en las intersecciones semaforizadas.

El modelo de Sun *et al.* (2008) asume las mismas velocidades entre todos los pares de estaciones, lo cual no se corresponde con la realidad, no contempla la capacidad de pasajeros de los autobuses, ni la capacidad en vehículos de las estaciones, ni la capacidad de pasajeros de las estaciones. Tampoco tiene en cuenta los tiempos de espera en los cruces semaforizados. Nótese que no recibe los datos de demanda a través de una matriz origen-destino, sino que toma esta información del número de pasajeros que asciende y desciende de los autobuses en cada estación. Esto abstrae mucho los comportamientos de demanda de los pasajeros y pierde información valiosa para la operación del sistema. Entre las variables que tiene en cuenta están los costes de espera dentro de la estación y los costes de espera dentro del vehículo para los pasajeros. Vale la pena destacar el componente innovador de la codificación de tamaño variable y el uso de variables binarias para indicar si un autobús se detiene o no en una estación.

El modelo de Chen *et al.* (2012) es uno de los más completos entre los que se han revisado en este trabajo, y es de hecho el que incluye más variables de costes. Es el único de los modelos que incluye los tiempos de abordaje y descenso de los pasajeros, y los tiempos de detención de los autobuses en los semáforos. Sin embargo, presenta algunas desventajas tales como que el modelo solamente contempla la inclusión de una ruta express, es decir, que no se pueden evaluar escenarios en los que exista más de una ruta express. De esta forma, el modelo

busca obtener cuál es la mejor frecuencia para una combinación de rutas corriente y express que conviven en una troncal. Como parámetros recibe la matriz origen-destino, las estaciones en donde se detiene la ruta express y el tamaño de la flota de autobuses. Finalmente, hay que mencionar que no contempla la congestión de vehículos ni la congestión de pasajeros en de las estaciones.

El modelo de Leiva *et al.* (2010) es también muy completo y posiblemente el que mejor pueda representar los costes en un sistema BRT real. Esto es posible gracias a que permite la inclusión de varias rutas express para un mismo corredor y porque discrimina muy bien los costes de tiempos de viaje y operación. Tiene algunas limitaciones, como el hecho de que no contempla los tiempos de detención y arranque, los tiempos de abordaje y descenso, y los tiempos de detención en los semáforos. El modelo propuesto se encarga de encontrar los tiempos de *headway* que permitan optimizar la operación de acuerdo a una función de costes.

En la Tabla 5.1 se puede ver una comparación de las características que tienen las propuestas revisadas de mayor relevancia. En esta matriz se puede ver claramente que ninguna de las propuestas tiene en cuenta la congestión de vehículos de las estaciones, ni la congestión de pasajeros dentro de las estaciones. Esto es preocupante, ya que como se menciona en Cain *et al.* (2006), Steer Davies Gleave (2007) y Wright y Hook (2007) el cuello de botella, en cuanto a capacidad se refiere, de los sistemas BRT está en la capacidad en vehículos de las estaciones. El hecho de que ninguna propuesta haya contemplado este aspecto puede estar ligado a que hasta el día de hoy existan pocos sistemas BRT que hayan sobrepasado su capacidad o estén cerca de hacerlo, por lo cual las propuestas se han concentrado principalmente en la reducción de los tiempos de espera de los usuarios y los costes de operación, y no en el aumento de la capacidad de los sistemas.

| Propuesta | Parámetros de entrada | Variables de costes | | | | | | | Restricciones | | | |
|-----------|-----------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------------|-------------|-----------------------------|----------------------------|------------------|----------------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|
| | Matriz Origen-Destino | Tiempo espera en estación | Tiempo espera en vehículo | Tiempo espera siguiente autobús | Transbordos | Tiempo detención y arranque | Tiempo abordaje y descenso | Tiempo semáforos | Costes de operación de autobuses | Capacidad pasajeros autobús | Capacidad pasajeros estación | Capacidad vehicular estación |
| 1 | X | X | X | X | . | . | . | . | . | X | . | . |
| 2 | . | . | . | X | . | . | . | . | . | . | . | . |
| 3 | X | X | X | . | X | X | . | . | . | . | . | . |
| 4 | X | X | X | . | X | . | . | . | X | X | . | . |
| 5 | X | X | X | . | . | X | X | X | X | X | . | . |
| 6 | . | X | X | . | . | X | . | . | X | . | . | . |

TABLA 5.1 – Comparación de propuestas para la optimización de sistemas BRT.

¹Duarte *et al.* (2008)²López *et al.* (2011)³Valbuena y Hidalgo (2005)⁴Leiva *et al.* (2010)⁵Chen *et al.* (2012)⁶Sun *et al.* (2008)

| Propuesta | Método de solución |
|-----------------------------|---------------------------|
| Duarte <i>et al.</i> (2008) | Algoritmo genético |
| López <i>et al.</i> (2011) | Redes de Petri |
| Valbuena y Hidalgo (2005) | Software (N/D) |
| Leiva <i>et al.</i> (2010) | Software (N/D) |
| Chen <i>et al.</i> (2012) | Algoritmo genético |
| Sun <i>et al.</i> (2008) | Algoritmo genético |

TABLA 5.2 – Técnicas usadas para la optimización de sistemas BRT.

En la revisión de artículos realizada se encontró que ninguna propuesta para mejorar sistemas BRT contempla el uso de retornos operacionales, que también puede aumentar la capacidad de los sistemas. También se encontró que ninguno de los modelos sirve para hacer diseños automatizados de rutas, lo más cercano a esto lo proporcionan Chen *et al.* (2012) y Leiva *et al.* (2010), que ofrecen modelos de validación para rutas que se les pueden pasar como parámetros al modelo. Tampoco se encontraron propuestas que utilizaran algoritmos multiobjetivo para encontrar soluciones.

Un aspecto primordial para poder modelar correctamente los sistemas BRT es el comportamiento del usuario. Es importante modelar de manera acertada qué rutas va a elegir un usuario dado un par origen-destino. Es probable que el usuario elija la ruta que menos tiempo le tome, pero esto no siempre ocurre, ya sea por desconocimiento, por evitar transbordos, o porque la ruta que menos tiempo le toma tiene frecuencias muy bajas y prefiere no esperarla. Esta es una de las partes menos exploradas en la literatura de sistemas BRT.

UN NUEVO MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA SISTEMAS BRT

EN ESTE CAPÍTULO se propone un nuevo modelo para la optimización de sistemas BRT específicamente orientado a mejorar el sistema TransMilenio. Este modelo se ha desarrollado tomando en cuenta la información recopilada acerca de los sistemas BRT y TransMilenio, las técnicas de optimización propuestas y las características propias de este sistema BRT. El nuevo modelo está basado fundamentalmente en los dos que se proponen en Chen *et al.* (2012) y Leiva *et al.* (2010), además se incluye una nueva restricción propia de este trabajo. En las siguientes secciones se describen en detalle las propuestas de Chen *et al.* (2012) y Leiva *et al.* (2010), y se formula el nuevo modelo.

6.1 PROBLEMA

A lo largo de este documento se ha hablado acerca de optimizar el sistema TransMilenio. En este contexto, optimizar se refiere a minimizar los tiempos que pasan los pasajeros dentro del sistema y los costes asociados a la operación de los autobuses, a través de la modificación de las frecuencias de partida de cada una de las rutas que circulan por el sistema.

Problema a resolver “Encontrar un conjunto de frecuencias de partida para cada ruta que minimice el tiempo que pasan los pasajeros en el sistema y los costes de operación. Este conjunto de frecuencias debe satisfacer las restricciones asociadas a la operación del sistema TransMilenio”.

El problema a resolver es analizado dentro de la ventana de tiempo correspondiente a la hora punta del sistema, ya que es la franja horaria dentro de la cual se están presentado los problemas de congestión en TransMilenio.

6.1.1 Información disponible

El conjunto de **estaciones** determina el tamaño del sistema BRT. El número de estaciones está ligado directamente a la complejidad del problema a resolver. Se debe tener información acerca de cuáles son las estaciones del sistema, las troncales a las que pertenecen y el conjunto de estaciones hacia las cuales se puede ir desde cada estación, en otras palabras, el conjunto de estaciones vecinas de cada estación. El conjunto de estaciones de TransMilenio está denotado por $E = \{e_1, \dots, e_{143}\}$, donde e_i se refiere a la estación i y E es el conjunto de las 143 estaciones que existen actualmente en TransMilenio.

Las **rutas** son trayectos entre dos estaciones (normalmente entre estaciones de cabecera), y están compuestas por el conjunto de estaciones en las cuales se detienen los autobuses. El conjunto de rutas de TransMilenio está denotado por $R = \{r_1, \dots, r_i, \dots, r_{90}\}$, donde r_i se refiere a la ruta i y R es el conjunto de las 90 rutas que operan entre semana en TransMilenio. Cada ruta además está compuesta por un conjunto de estaciones en las cuales se detienen los autobuses, y está denotada por $r_i = \{e_1^i, \dots, e_j^i, \dots, e_m^i\}$, donde e_j^i es la j -ésima estación en la que se detienen los autobuses de la ruta i .

Las **frecuencias** determinan cada cuánto parten los autobuses de una determinada ruta. El conjunto de frecuencias está denotado por $F = \{f_1, \dots, f_k, \dots, f_{90}\}$, donde f_k es la frecuencia de salida de los autobuses de la ruta k . A partir de las frecuencias se puede calcular el *headway* y viceversa.

La **capacidad de vehículos de las estaciones** es sumamente importante, sobre todo en los casos en los que el sistema BRT está llegando al límite de su capacidad, como sucede con TransMilenio. Cuando el sistema está al borde de su capacidad máxima el problema pasa de ser un problema de minimizar costes a ser un problema de encontrar soluciones factibles que permitan satisfacer toda la demanda del sistema. Como complemento a este parámetro, es importante conocer también el número de plataformas de abordaje que tiene cada estación. La capacidad de vehículos de las estaciones está denotada por $k_{e_i}^s, i = 1, \dots, 143$, que se refiere a la capacidad de vehículos que tiene la estación e_i .

La **capacidad de pasajeros de las estaciones** también resulta ser un parámetro importante a considerar, ya que con esto se puede prevenir la congestión de personas dentro de las estaciones. Teniendo en cuenta este parámetro se pueden diseñar rutas que hagan transbordos en las estaciones menos congestionadas, para no saturar las estaciones en las que circulan una mayor cantidad de usuarios. Este parámetro no está contemplado dentro del modelo propuesto. La capacidad de pasajeros de las estaciones está denotada por $k_{e_i}^p$, que se refiere a la capacidad de pasajeros que tiene la estación e_i .

De los **autobuses** se requiere información acerca de la cantidad y la capacidad

de cada tipo de autobús que está en operación. Para simplificar las cosas, se asumirá que cada ruta tendrá siempre el mismo tipo de autobuses. Esta información es importante para imponer restricciones de capacidad dentro de los autobuses y para que no se diseñen conjuntos de rutas que operen con más autobuses de los que se dispone. La capacidad de pasajeros que tienen los autobuses está denotada por $k_{r_k}^b$, $k = 1, \dots, 90$, que se refiere a la capacidad de pasajeros que tienen los vehículos que operan la ruta r_k .

Las **distancias entre estaciones** sirven para calcular los tiempos de viaje entre cada par de estaciones. La distancia entre dos estaciones e_i y e_j está denotada por $d_{e_i e_j}$.

Las **velocidades** entre cada par de estaciones son importantes ya que no todas las troncales tienen las mismas características y en todas no se puede operar a la misma velocidad. Algunas troncales tienen intersecciones semaforizadas, mientras que otras construidas sobre autopistas permiten desplazamientos más rápidos. Por ejemplo, la troncal del eje ambiental de TransMilenio está sobre una calle adoquinada con mucho tránsito peatonal, lo cual ocasiona que las velocidades de los autobuses sean muy bajas. Los modelos propuestos en Chen *et al.* (2012) y Leiva *et al.* (2010) contemplan también las velocidades entre cada par de estaciones. La velocidad entre dos estaciones e_i y e_j está denotada por $s_{e_i e_j}$.

Los **tiempos de frenado y arranque** junto con los de tiempos de ascenso y descenso de los pasajeros sirven para determinar el tiempo total de una detención, pero se diferencia en que es constante y no depende de la demanda de pasajeros del sistema. Basándose en el modelo propuesto en Chen *et al.* (2012) se asume que estos tiempos son los mismos para todas las estaciones. Los tiempos de frenado y arranque están denotados por d .

La **distribución de llegadas de los autobuses a las estaciones** es un valor que permitirá calcular el tiempo promedio que los usuarios esperan dentro de las estaciones. En sistemas con variabilidad nula (es decir, tiempos de llegadas determinísticos) este valor será igual a $\lambda/2$ minutos si suponemos que el tiempo entre llegadas de autobuses es de λ minutos. En general, sin embargo, las llegadas de los autobuses son aleatorias, y se suele asumir que se ajustan a una distribución de Poisson de media λ , entonces el valor medio de espera sería λ . La distribución de llegadas de los autobuses a las estaciones está denotada por ϵ .

Los **costes** generalmente se dividen en costes de tiempo de espera de los pasajeros y los costes asociados a la operación del sistema BRT. Para el modelo propuesto se tienen tres tipos: el coste del tiempo de espera de los pasajeros en las estaciones, el coste del tiempo de espera de los pasajeros dentro de los autobuses (también llamado coste de tiempo de viaje), y el coste de operación de los autobuses. Los costes fijos, tales como limpieza de las estaciones, personal de gerencia, gastos de energía eléctrica, arriendos, entre otros, no se tienen en cuenta ya que son independientes de la operación del sistema BRT (Chen *et al.* 2012). La unidad de coste por kilómetro recorrido, la unidad de coste por tiempo de espera en la estación y la unidad de coste de tiempo de espera dentro del autobús, están denotadas respectivamente por μ_O , μ_S y μ_B . Estos valores son los que utiliza la

función de coste para evaluar la calidad de los conjuntos de rutas.

La **matriz origen-destino** contiene información acerca de la demanda, expresada en la cantidad de personas que van desde una estación e_i hasta una estación e_j . Esta matriz describe la demanda de pares de destinos que hay en el sistema. Para el caso de TransMilenio se usa una matriz origen-destino con datos de la hora punta, ya que es la franja de tiempo en la que el sistema está más cargado. La cantidad de pasajeros que viaja de una estación e_i hasta una estación e_j está denotada por $q_{e_i e_j}$.

Los **tiempos de ascenso y descenso de pasajeros** sirven para determinar el tiempo total de detención/parada de un autobús en una estación. Cuantas más personas se suban o descendan de un autobús, mayor va a ser el tiempo de detención. Partiendo del modelo propuesto en Chen *et al.* (2012), podemos calcular el tiempo de ascenso de pasajeros en una estación como $\alpha_{e_i}^{r_k} \times \tau^\alpha$, donde $\alpha_{e_i}^{r_k}$ es la tasa de ascenso de pasajeros para la ruta r_k en la estación e_i y τ^α es el tiempo que tarda cada pasajero en subir a un autobús. De igual forma, el tiempo de descenso está dado por $\beta_{e_i}^{r_k} \times \tau^\beta$, en donde β se usa para referirse a los descensos.

Las **horas de operación** establecen el horario en el cual funciona el sistema BRT, el cual está denotado por T .

6.1.2 Variables de decisión

Las variables de decisión son aquellos valores que el modelo irá variando para encontrar las mejores soluciones al problema de optimizar los sistemas BRT. Las variables de decisión que se han considerado son las frecuencias de partida asociadas a las rutas. De esta forma, se pretende optimizar el sistema TransMilenio a través de la variación de las frecuencias.

6.2 FUNCIÓN DE COSTE

Varios autores (Chen *et al.* 2012; Leiva *et al.* 2010; Sun *et al.* 2008) coinciden en que la función de coste está dada por la suma de tres elementos: el coste de operación de los autobuses, el coste del tiempo de espera de los pasajeros en la estación y el coste del tiempo de espera de los pasajeros dentro de los vehículos. Estos dos últimos costes pueden agruparse dentro del coste total del viaje de los pasajeros (Chen *et al.* 2012).

En las tres propuestas descritas, se busca minimizar estos costes variando los tiempos de frecuencia de las rutas, es decir, variando la variable f_{r_k} . El conjunto de rutas, con la información de las estaciones en que se detienen, constituyen la información disponible la cual es constante. Una línea de investigación abierta es el diseño automatizado de rutas y ajuste de frecuencias que permitan minimizar la función de coste.

Nótese que en este modelo todos los costes son llevados a una moneda común, lo cual posibilita que la función deba minimizar solamente un objetivo. Sería muy interesante incorporar al modelo una naturaleza multiobjetivo para que encuentre

6.2. FUNCIÓN DE COSTE

soluciones que se encuentren en el frente de Pareto. Esto último formará parte de las líneas futuras de investigación de este trabajo.

Además, existe la posibilidad de incorporar los tiempos de transbordos. El tiempo de transbordo es el tiempo que necesita un pasajero para cambiar de una ruta a otra, debido a que el primer autobús que tomó no para en la estación a la cual se dirige el pasajero. Estos tiempos normalmente son penalizados, y en la revisión del estado del arte que se hizo, solamente Leiva *et al.* (2010) contemplan los tiempos de transbordos. La inclusión de los costes de los transbordos también hace parte de las líneas futuras de investigación.

Vamos a describir cada componente de la función de coste tomando como base los modelos propuestos en Chen *et al.* (2012), Leiva *et al.* (2010), Sun *et al.* (2008); ya que son los únicos que tienen en cuenta los tres componentes principales para calcular el coste que mencionamos anteriormente.

La función de coste que se quiere minimizar es la siguiente:

$$\min C = C_O + C_S + C_B, \quad (6.1)$$

donde

- C es el coste total,
- C_O es el coste de operación,
- C_S es el coste de tiempo de espera en las estaciones,
- C_B es el coste de tiempo de espera dentro de los vehículos.

6.2.1 Costes de operación

El modelo propuesto en Chen *et al.* (2012) calcula los costes de operación basándose en la distancia recorrida por cada autobús sumando con los costes generados por el desgaste de los autobuses. Éste solamente incluye dos rutas, una corriente y otra express. Si se quiere tener en cuenta un escenario con un conjunto R de rutas, es necesario modificar la función de coste.

El modelo propuesto en Leiva *et al.* (2010) calcula los costes de operación basándose en el coste total que tiene completar un ciclo completo de una ruta.

Finalmente, el modelo propuesto en Sun *et al.* (2008) calcula los costes de operación basándose en el tiempo en minutos que un autobús está en operación.

De las tres propuestas se puede debatir acerca de la exactitud real que arroja el cálculo de costes de operación. Tener costes de operación por kilómetro exactos, incluyendo costes de devaluación de los autobuses (Chen *et al.* 2012), es algo muy difícil, igualmente sucede con los costes calculados por minuto de operación (Sun *et al.* 2008) y con los costes calculados en base al ciclo de ruta de un autobús. Cualquiera de estos tres modelos es correcto y la elección depende de la forma en que se calculen los costes por parte de los operadores del sistema BRT. En el caso de TransMilenio los costes son calculados por kilómetro recorrido y por eso se ha optado por incluir una función de coste basada en distancia y que incluya un conjunto de rutas que pueden ser express o corrientes.

$$C_O = \mu_O \times \sum_{r_k \in R} T \times f_{r_k} \times D_{r_k}, \quad (6.2)$$

donde

- C_O es el coste total de operación,
- D_r es la longitud del trayecto que recorre la ruta r_k ,
- μ_O es el coste unitario por kilómetro para un vehículo BRT,
- f_{r_k} es la frecuencia de partida de la ruta r_k ,
- R es el conjunto de todas las rutas operadas en el sistema,
- T son las horas de operación del sistema BRT.

6.2.2 Costes de tiempos de espera en estaciones

Se excluye la propuesta que aparece en Sun *et al.* (2008) ya que esta no parte de una matriz origen-destino para establecer los niveles de demanda, sino que lo hace únicamente a través de las tasas de entrada y salida de las estaciones, lo cual carece del nivel de detalle requerido para abordar el problema de optimizar el sistema BRT de forma efectiva.

En el modelo propuesto en Chen *et al.* (2012) se calculan los costes de tiempo de espera en estaciones basándose en la cantidad de viajes que hay entre cada par de estaciones y en el *headway* de cada ruta.

Chen *et al.* (2012) asumen que la llegada de los pasajeros a las estaciones es uniforme, por lo cual el tiempo de espera promedio de los pasajeros va a ser igual a la mitad del *headway*, y está expresado como $\frac{h^k}{2}$. Hay que tener en cuenta que el modelo presentado en Chen *et al.* (2012) solamente incluye dos rutas, una corriente y otra express. Si se quiere tener en cuenta un escenario con un conjunto R de rutas, se debe modificar la función de coste.

El problema con esta función de coste es que se asume que los pasajeros solamente van a elegir una ruta para llegar a su destino, y esto no siempre sucede. Muchas veces los pasajeros tienen varias rutas alternativas para llegar a su destino y abordan el primer autobús de la ruta que les sirva.

El modelo propuesto en Leiva *et al.* (2010) calcula los costes de tiempo de espera en estaciones basándose en la cantidad de viajes que hay entre cada par de estaciones, la frecuencia de partida de cada ruta y un parámetro cuyo valor depende de la distribución de las llegadas de los autobuses a las estaciones. Además esta función de coste modela el hecho de que los pasajeros pueden elegir más de una ruta para llegar a su destino, lo cual tiene correspondencia con el mundo real.

Nótese que en ninguna de las tres propuestas presentadas se tienen las restricciones asociadas con la capacidad de los autobuses, y por lo tanto, se asume que los pasajeros siempre podrán abordar el primer autobús que llega. En la realidad los autobuses pueden llegar llenos, lo que ocasiona que los pasajeros tengan que esperar el siguiente autobús.

Solamente Leiva *et al.* (2010) tienen conciencia de este problema, y lo aborda aplicando un factor de reserva a la capacidad real de los vehículos para asegurar de

6.2. FUNCIÓN DE COSTE

que haya un margen disponible para absorber cualquier fluctuación momentánea en la demanda. La desventaja que tiene este margen es que subestima la capacidad total del sistema, por lo cual las soluciones encontradas usando esta función de coste no van a aprovechar al máximo la capacidad existente. El modelo propuesto en este trabajo utiliza la misma función de coste de Leiva *et al.* (2010) y por lo tanto tiene el mismo problema.

Para el modelo propuesto en este documento se ha optado por utilizar la función de coste de Leiva *et al.* (2010) ya que contempla el hecho de que los pasajeros pueden abordar más de una ruta para llegar a su destino, y optarán por tomar la ruta que primero llegue. Esto hace de la función de coste de Leiva *et al.* (2010) la más completa de las que se estudiaron. La función de coste para el tiempo de espera en estaciones es la siguiente:

$$C_S = \mu_S \times \sum_{e_i, e_j \in E} q_{e_i e_j} \frac{\epsilon}{\sum_{r_k \in R} f_{r_k} \times x_{e_i e_j}^{r_k}}, \quad (6.3)$$

- C_S es el coste total del tiempo de espera en las estaciones,
- μ_S es el coste del tiempo de espera para un usuario en una estación,
- f_{r_k} es la frecuencia de la ruta r_k ,
- $x_{e_i e_j}^{r_k}$ es una variable binaria que indica el atractivo de una ruta r_k para una viaje de la estación e_i a la estación e_j . Toma el valor de 1 si la ruta es atractiva y 0 si no lo es,
- $q_{e_i e_j}$ es la demanda de viaje para el par origen-destino $e_i - e_j$,
- ϵ es la distribución de las llegadas de los autobuses a las estaciones.

6.2.3 Costes de tiempos de espera dentro del autobús

Al igual que con los costes de tiempo de espera en las estaciones explicado en la sección anterior, se excluye la propuesta que aparece en Sun *et al.* (2008) por las mismas razones mencionadas anteriormente.

En Chen *et al.* (2012) se calculan los costes de tiempo de espera teniendo en cuenta la cantidad de viajes que se hacen entre cada par de estaciones y el tiempo que dura el viaje entre las mismas. Esta función de coste solamente contempla dos rutas, una corriente y otra express. Para poder calcular el coste de un conjunto R de rutas la función de coste debe extenderse.

El problema con la función de coste de Chen *et al.* (2012) es que asume que a un pasajero solamente le sirve una ruta para llegar a su destino, lo cual no siempre sucede.

En Leiva *et al.* (2010) se calculan los costes de tiempo de espera teniendo en cuenta la cantidad de viajes que se hacen entre cada par de estaciones, el tiempo que dura el viaje y las rutas que son atractivas para cada usuario.

En Chen *et al.* (2012) se presenta un modelo muy detallado de los tiempos de viaje dentro de un vehículo. Éste considera la distancia entre cada par de estaciones, las intersecciones semaforizadas, los tiempos de frenado y arranque, y lo más importante, la cantidad de pasajeros que abordan y descienden de un

autobús al llegar a una estación. Esta última variable determina el tiempo en que el autobús permanece detenido en una estación, y está directamente relacionado con la demanda que los pasajeros tienen sobre esta ruta en las estaciones en las que se detiene. La desventaja de este modelo es que asume que un pasajero usará únicamente una ruta para llegar a su destino.

El modelo de Leiva *et al.* (2010) no presenta una función de coste tan detallada como la que aparece en Chen *et al.* (2012), pero tiene una ventaja muy grande, permite la inclusión de varias alternativas de rutas para un pasajero, lo que se adapta mucho al mundo real. Sin embargo, ésto no es del todo perfecto, ya que para calcular con precisión el coste no basta con incluir las alternativas de rutas para el usuario, también hay que modelar su comportamiento. Muchos usuarios deciden no abordar un autobús porque está congestionado y prefieren esperar al siguiente para viajar más cómodos.

Para el modelo propuesto en este documento se ha optado por utilizar un híbrido entre las funciones de coste de Chen *et al.* (2012) y Leiva *et al.* (2010). Se han incorporado las variables que modelan la elección de múltiples rutas de Leiva *et al.* (2010) junto con las variables de Chen *et al.* (2012) que permiten el cálculo detallado de los tiempos de viaje de los autobuses. La función resultante para el cálculo del coste del tiempo de espera dentro de los autobuses es la siguiente:

$$C_B = \mu_B \times \sum_{e_i, e_j \in E} q_{e_i e_j} \times \frac{\sum_{r_k \in R} t_{e_i e_j}^{r_k} \times f_{r_k} \times x_{e_i e_j}^{r_k}}{\sum_{r_k \in R} f_{r_k} \times x_{e_i e_j}^{r_k}}, \quad (6.4)$$

donde

- C_B es el coste de tiempo de espera dentro de los vehículos,
- $q_{e_i e_j}$ es la demanda de viaje para el par origen-destino $e_i - e_j$,
- $t_{e_i e_j}^{r_k}$ es el tiempo de viaje dentro del vehículo en la ruta r_k para el par origen-destino $e_i - e_j$,
- μ_B es el valor del tiempo de viaje dentro del vehículo por persona,
- f_{r_k} es la frecuencia de la ruta r_k ,
- $x_{e_i e_j}^{r_k}$ es una variable binaria que indica el atractivo de una ruta r_k para una viaje de la estación e_i a la estación e_j . Toma el valor de 1 si la ruta es atractiva y 0 si no lo es,
- R es el conjunto de todas las rutas operadas en el sistema,
- E es el conjunto de todas las estaciones del sistema.

$$t_{e_i e_j}^{r_k} = t_{e_i e_j}^{1r_k} + t_{e_i e_j}^{2r_k}, \quad (6.5)$$

donde

$$t_{e_i e_j}^{1r_k} = \frac{d_{e_i e_j}}{s_{e_i e_j}}, \quad (6.6)$$

6.3. RESTRICCIONES

$$t_{e_i e_j}^{2r_k} = \left(\frac{\sum_{e_i \in P_{r_k}}^{e_j} \alpha_{e_i}^{r_k} \times \tau^\alpha}{f_{r_k}} + \frac{\sum_{e_i \in P_{r_k}}^{e_j} \beta_{e_i}^{r_k} \times \tau^\beta}{f_{r_k}} \right) + N_{e_i e_j} \times d, \quad (6.7)$$

y

- $t_{e_i e_j}^{1r_k}$ es el tiempo de viaje desde la estación e_i hasta la estación e_j ,
- $t_{e_i e_j}^{2r_k}$ es el tiempo de demora en las estaciones desde la estación e_i hasta la estación e_j ,
- f_{r_k} es la frecuencia de la ruta r_k ,
- P_{r_k} es el conjunto de estaciones en las que se detiene la ruta r_k ,
- $d_{e_i e_j}$ es la distancia del corredor desde la estación e_i hasta la estación e_j ,
- $s_{e_i e_j}$ es la velocidad promedio desde la estación e_i hasta la estación e_j ,
- $\alpha_{e_i}^r$ es la tasa de abordajes en la estación e_i para la ruta r_k ,
- $\beta_{e_i}^r$ es la tasa de descensos en la estación e_i para la ruta r_k ,
- τ^α es el tiempo de abordaje por pasajero,
- τ^β es el tiempo de descenso por pasajero,
- $N_{e_i e_j}$ es el número de estaciones entre la estación e_i y la estación e_j ,
- d es la demora de las aceleraciones y desaceleraciones en las estaciones.

6.3 RESTRICCIONES

Los modelos presentados en Chen *et al.* (2012) y Leiva *et al.* (2010) imponen varias restricciones para las soluciones a generar. La única restricción que tienen en común es la restricción de capacidad de pasajeros de los autobuses. Teniendo esto en cuenta, se puede crear un nuevo modelo que incorpore las restricciones de ambos, para que se asemeje más a lo que sucede en el mundo real, y que además reduzca el espacio de búsqueda.

Las restricciones presentadas en Sun *et al.* (2008) se excluyen por las mismas razones indicadas anteriormente: este modelo no toma la demanda de una matriz origen-destino.

6.3.1 Capacidad de pasajeros de los autobuses

Esta restricción asegura que las frecuencias de partida de los autobuses sean lo suficientemente altas como para que la capacidad de éstos no se vea desbordada. No imponer esta restricción podría ocasionar congestión dentro de los autobuses, lo cual deriva en incomodidad para los pasajeros, y también en el hecho de que los pasajeros tengan que esperar al siguiente autobús porque el que llega está lleno.

Las restricciones de capacidad de pasajeros dentro de los autobuses presentadas en Chen *et al.* (2012) se imponen basándose en el *headway* de cada ruta, las horas de operación del sistema, la capacidad de pasajeros de los autobuses

y el máximo número de pasajeros entre estaciones. De nuevo, esta restricción solamente contempla dos rutas, una corriente y otra express. Para poder calcular el coste de un conjunto R de rutas la restricción debe extenderse.

Las restricciones de capacidad de pasajeros dentro de los autobuses presentadas en Leiva *et al.* (2010) se imponen basándose en la frecuencia de cada ruta, la capacidad de pasajeros de los autobuses, las rutas atractivas para cada pasajero y la demanda entre cada par de origen-destino.

De las restricciones de capacidad de pasajeros de los vehículos presentadas, la que aparece en Leiva *et al.* (2010) es la más completa, ya que incluye un conjunto de rutas alternativas para los usuarios, y por lo tanto, es la que mejor se ajusta a un sistema real.

Para este trabajo se ha optado por incorporar la restricción de capacidad de pasajeros en los autobuses presentada en Leiva *et al.* (2010), ya que es la única que contempla la posibilidad de que los pasajeros puedan elegir más de una ruta para llegar a su destino. La restricción es la siguiente:

$$k_{r_k}^b \times f_{r_k} \geq \sum_{e_i \in P_{r_k}} \sum_{e_j \in P_{r_k}} q_{e_i e_j} \times \frac{f_{r_k} \times x_{e_i e_j}^{r_k}}{\sum_{r_m \in R} f_{r_m} \times x_{e_i e_j}^{r_m}}, \quad \forall r_k \in R, \quad \forall a \in P_{r_k}, \quad (6.8)$$

- $k_{r_k}^b$ es la capacidad de los autobuses en la ruta r_k ,
- f_{r_k} es la frecuencia de la ruta r_k ,
- P_{r_k} es el conjunto de estaciones en las que se detiene la ruta r_k ,
- $q_{e_i e_j}$ es la demanda en un par origen-destino $e_i - e_j$ en el corredor,
- $x_{e_i e_j}^{r_k}$ es una variable binaria que indica el atractivo de una ruta r_k para una viaje de la estación e_i a la estación e_j . Toma el valor de 1 si la ruta es atractiva y 0 si no lo es,
- R es el conjunto de todas las rutas operadas en el sistema.

6.3.2 Tamaño de la flota de autobuses

Imponer esta restricción impedirá que el conjunto de frecuencias encontrado por el modelo asigne más autobuses de los que existen en el sistema. De esta forma se asegura trabajar con los recursos disponibles.

Solamente Chen *et al.* (2012) incorporan restricciones para que la cantidad de autobuses que circulen no exceda el tamaño de la flota existente. Esta restricción solamente contempla dos rutas, una corriente y otra express. Para poder calcular el coste de un conjunto R de rutas la restricción debe extenderse.

Dado que solo Chen *et al.* (2012) contemplan esta restricción, ésta se incluye en el modelo propuesto en este trabajo, modificándola para que opere con un conjunto R de rutas. La restricción se expone a continuación:

$$\frac{T}{N^{r_k}} \leq \frac{1}{f_{r_k}}, \quad \forall r_k \in R, \quad (6.9)$$

- T son las horas de operación del sistema BRT,

6.3. RESTRICCIONES

- f_{r_k} es la frecuencia de la ruta r_k ,
- N^{r_k} es el número de vehículos existentes que pueden ser usados para los autobuses de la ruta r_k ,
- R es el conjunto de todas las rutas operadas en el sistema.

6.3.3 Elección de alternativas de rutas

Esta restricción ayuda a modelar un poco el comportamiento de los usuarios a la hora de elegir que ruta tomar para ir a su destino. Modela el hecho de que en muchas ocasiones varias rutas pueden servirle al usuario para llegar a su destino en la misma cantidad de tiempo.

En Leiva *et al.* (2010) se presenta una restricción que asegura que los usuarios elijen la ruta o las rutas con coste mínimo para sus viajes. Esta restricción la incorporamos a nuestro modelo ya que las alternativas de rutas es algo que hemos incluido dentro de las funciones de coste. La restricción es la siguiente:

$$x_{e_i e_j}^{r_k} = 1 \iff \mu_B \times t_{e_i e_j}^{r_k} \leq \frac{\epsilon \times \mu_S + \mu_B \times \sum_{r_m \neq r_k} t_{e_i e_j}^{r_m} \times f_{r_m} \times x_{e_i e_j}^{r_m}}{\sum_{r_m \neq r_k} f_{r_m} \times x_{e_i e_j}^{r_m}}, \quad (6.10)$$

$$\forall r_k \in R, \quad \forall e_i, e_j \in E,$$

- $x_{e_i e_j}^{r_k}$ es una variable binaria que indica el atractivo de una ruta r_k para una viaje de la estación e_i a la estación e_j . Toma el valor de 1 si la ruta es atractiva y 0 si no lo es,
- μ_B es el valor del tiempo de viaje dentro del vehículo por persona,
- $t_{e_i e_j}^{r_k}$ es el tiempo de viaje dentro del vehículo en la ruta r_k para el par origen-destino $e_i - e_j$,
- μ_S es el coste del tiempo de espera para un usuario en una estación,
- ϵ es la distribución de las llegadas de los autobuses a las estaciones,
- f_{r_m} es la frecuencia de la ruta r_m ,
- $k_{e_i}^S$ es la capacidad de vehículos de la estación e_i ,
- $v_{e_i}^{r_k}$ indica si la ruta r_k se detiene en la estación e_i . Toma el valor de 1 en caso de que se detenga y 0 de lo contrario,
- R es el conjunto de todas las rutas operadas en el sistema,
- E es el conjunto de todas las estaciones del sistema.

6.3.4 Capacidad de vehículos de las estaciones

Como se ha mencionado anteriormente, no se encontró ninguna propuesta para optimizar sistemas BRT que incorporaran restricciones que impidieran que se sobrepase la capacidad de vehículos de las estaciones. Esta restricción es sumamente importante sobretodo en sistemas con alta demanda en los que se están alcanzando los límites de capacidad, ya que como se menciona en la Sección 4.2.5 la capacidad de los vehículos de las estaciones es el cuello de botella del sistema.

El no imponer esta restricción podría generar filas de autobuses esperando por descargar y recoger pasajeros en las estaciones, en otras palabras, esta restricción previene la congestión vehicular en las estaciones.

La restricción de capacidad de vehículos de las estaciones que hemos creado es la siguiente:

$$k_{e_i}^s \geq \sum_{r_k \in R} v_{e_i}^{r_k} \times f_{r_k}, \quad \forall e_i \in E, \quad (6.11)$$

donde,

- $k_{e_i}^s$ es la capacidad de vehículos de la estación e_i ,
- $v_{e_i}^{r_k}$ indica si la ruta r_k se detiene en la estación e_i . Toma el valor de 1 en caso de que se detenga y 0 de lo contrario.

6.4 EL NUEVO MODELO

A manera de resumen, y con el objetivo de condensar todo en una sección, a continuación se describe el nuevo modelo propuesto:

6.4.1 Función objetivo

$$\min C = C_O + C_S + C_B, \quad (6.12)$$

6.4.1.1 Costes de operación

$$C_O = \mu_O \times \sum_{r_k \in R} T \times f_{r_k} \times D_{r_k}, \quad (6.13)$$

donde

- C_O es el coste total de operación,
- D_r es la longitud del trayecto que recorre la ruta r ,
- μ_O es el coste por kilómetro para un vehículo BRT,
- f_{r_k} es la frecuencia de partida de la ruta r_k ,
- R es el conjunto de todas las rutas operadas en el sistema,
- T son las horas de operación del sistema BRT.

6.4.1.2 Costes de tiempos de espera en estaciones

$$C_S = \mu_S \times \sum_{e_i, e_j \in E} q_{e_i e_j} \frac{\epsilon}{\sum_{r_k \in R} f_{r_k} \times x_{e_i e_j}^{r_k}}, \quad (6.14)$$

- C_S es el coste total del tiempo de espera en las estaciones,
- μ_S es el coste del tiempo de espera para un usuario en una estación,

6.4. EL NUEVO MODELO

- f_{r_k} es la frecuencia de la ruta r_k ,
- x_{ij}^r es una variable binaria que indica el atractivo de una ruta r para una viaje de la estación i a la estación j . Toma el valor de 1 si la ruta es atractiva y 0 si no lo es,
- $q_{e_i e_j}$ es la demanda de viaje para el par origen-destino $e_i - e_j$,
- ϵ es la distribución de las llegadas de los autobuses a las estaciones.

6.4.1.3 Costes de tiempos de espera dentro del vehículo

$$C_B = \mu_B \times \sum_{e_i, e_j \in E} q_{e_i e_j} \times \frac{\sum_{r_k \in R} t_{e_i e_j}^{r_k} \times f_{r_k} \times x_{e_i e_j}^{r_k}}{\sum_{r_k \in R} f_{r_k} \times x_{e_i e_j}^{r_k}}, \quad (6.15)$$

donde

- $q_{e_i e_j}$ es la demanda de viaje para el par origen-destino $e_i - e_j$,
- $t_{e_i e_j}^{r_k}$ es el tiempo de viaje dentro del vehículo en la ruta r_k para el par origen-destino $e_i - e_j$,
- μ_B es el valor del tiempo de viaje dentro del vehículo por persona,
- f_{r_k} es la frecuencia de la ruta r_k ,
- $x_{e_i e_j}^{r_k}$ es una variable binaria que indica el atractivo de una ruta r_k para una viaje de la estación e_i a la estación e_j . Toma el valor de 1 si la ruta es atractiva y 0 si no lo es.

$$t_{e_i e_j}^{r_k} = t_{e_i e_j}^{1r_k} + t_{e_i e_j}^{2r_k}, \quad (6.16)$$

donde

$$t_{e_i e_j}^{1r_k} = \frac{d_{e_i e_j}}{s_{e_i e_j}}, \quad (6.17)$$

$$t_{e_i e_j}^{2r_k} = \left(\frac{\sum_{e_i \in P_{r_k}} \alpha_{e_i}^{r_k} \times \tau^\alpha}{f_{r_k}} + \frac{\sum_{e_i \in P_{r_k}} \beta_{e_i}^{r_k} \times \tau^\beta}{f_{r_k}} \right) + N_{e_i e_j} \times d, \quad (6.18)$$

y

- $t_{e_i e_j}^{1r_k}$ es el tiempo de viaje desde la estación e_i hasta la estación e_j ,
- $t_{e_i e_j}^{2r_k}$ es el tiempo de demora en las estaciones desde la estación e_i hasta la estación e_j ,
- f_{r_k} es la frecuencia de la ruta r_k ,
- P_{r_k} es el conjunto de estaciones en las que se detiene la ruta r_k ,
- $d_{e_i e_j}$ es la distancia del corredor desde la estación e_i hasta la estación e_j ,
- $s_{e_i e_j}$ es la velocidad promedio desde la estación e_i hasta la estación e_j ,

- $\alpha_{e_i}^r$ es la tasa de abordajes en la estación e_i para la ruta r_k ,
- $\beta_{e_i}^r$ es la tasa de descensos en la estación e_i para la ruta r_k ,
- τ^α es el tiempo de abordaje por pasajero,
- τ^β es el tiempo de descenso por pasajero,
- $N_{e_i e_j}$ es el número de estaciones entre la estación e_i y la estación e_j ,
- d es la demora de las aceleraciones y desaceleraciones en las estaciones.

6.4.2 Restricciones

6.4.2.1 Capacidad de pasajeros en los vehículos

$$k_{r_k}^b \times f_{r_k} \geq \sum_{e_i \in P_{r_k}} \sum_{e_j \in P_{r_k}} q_{e_i e_j} \times \frac{f_{r_k} \times x_{e_i e_j}^{r_k}}{\sum_{r_m \in R} f_{r_m} \times x_{e_i e_j}^{r_m}}, \quad \forall r_k \in R, \quad \forall a \in P_{r_k}, \quad (6.19)$$

donde

- $k_{r_k}^b$ es la capacidad de los autobuses en la ruta r_k ,
- f_{r_k} es la frecuencia de la ruta r_k ,
- P_{r_k} es el conjunto de estaciones en las que se detiene la ruta r_k ,
- $q_{e_i e_j}$ es la demanda en un par origen-destino $e_i - e_j$ en el corredor,
- $x_{e_i e_j}^{r_k}$ es una variable binaria que indica el atractivo de una ruta r_k para una viaje de la estación e_i a la estación e_j . Toma el valor de 1 si la ruta es atractiva y 0 si no lo es,
- R es el conjunto de todas las rutas operadas en el sistema.

6.4.2.2 Tamaño de la flota vehicular

$$\frac{T}{N^{r_k}} \leq \frac{1}{f_{r_k}}, \quad \forall r_k \in R, \quad (6.20)$$

donde

- T son las horas de operación del sistema BRT,
- f_{r_k} es la frecuencia de la ruta r_k ,
- N^{r_k} es el número de vehículos existentes que pueden ser usados para los autobuses de la ruta r_k ,
- R es el conjunto de todas las rutas operadas en el sistema.

6.4.2.3 Elección de rutas por parte de los usuarios

$$x_{e_i e_j}^{r_k} = 1 \iff \mu_B \times t_{e_i e_j}^{r_k} \leq \frac{\epsilon \times \mu_S + \mu_B \times \sum_{r_m \neq r_k} t_{e_i e_j}^{r_m} \times f_{r_m} \times x_{e_i e_j}^{r_m}}{\sum_{r_m \neq r_k} f_{r_m} \times x_{e_i e_j}^{r_m}}, \quad (6.21)$$

$$\forall r_k \in R, \quad \forall e_i, e_j \in E,$$

6.4. EL NUEVO MODELO

donde

- $x_{e_i e_j}^{r_k}$ es una variable binaria que indica el atractivo de una ruta r_k para una viaje de la estación e_i a la estación e_j . Toma el valor de 1 si la ruta es atractiva y 0 si no lo es,
- μ_B es el valor del tiempo de viaje dentro del vehículo por persona,
- $t_{e_i e_j}^{r_k}$ es el tiempo de viaje dentro del vehículo en la ruta r_k para el par origen-destino $e_i - e_j$,
- μ_S es el coste del tiempo de espera para un usuario en una estación,
- ϵ es la distribución de las llegadas de los autobuses a las estaciones,
- f_{r_m} es la frecuencia de la ruta r_m ,
- $k_{e_i}^s$ es la capacidad de vehículos de la estación e_i ,
- $v_{e_i}^{r_k}$ indica si la ruta r_k se detiene en la estación e_i . Toma el valor de 1 en caso de que se detenga y 0 de lo contrario,
- R es el conjunto de todas las rutas operadas en el sistema,
- E es el conjunto de todas las estaciones del sistema.

6.4.2.4 La capacidad de vehículos de las estaciones

$$k_{e_i}^s \geq \sum_{r_k \in R} v_{e_i}^{r_k} \times f_{r_k}, \quad \forall e_i \in E, \quad (6.22)$$

donde

- $k_{e_i}^s$ es la capacidad de vehículos de la estación e_i ,
- $v_{e_i}^{r_k}$ indica si la ruta r_k se detiene en la estación e_i . Toma el valor de 1 en caso de que se detenga y 0 de lo contrario,
- f_{r_k} es la frecuencia de la ruta r_k ,
- R es el conjunto de todas las rutas operadas en el sistema,
- E es el conjunto de todas las estaciones del sistema.

6.4.3 Ventajas

Este nuevo modelo propuesto presenta varias ventajas con respecto a los modelos existentes. Es el único modelo que incorpora un coste detallado de los tiempos de viaje junto con las distintas alternativas de rutas para los usuarios. Este modelo es el único que incorpora las cuatro restricciones mencionadas anteriormente, lo que reduce en gran medida el espacio de soluciones. La mayor ventaja que tiene con respecto a otros modelos es que incorpora una restricción de capacidad de vehículos en las estaciones. Esta restricción permite diseñar soluciones factibles que pueden aumentar la capacidad de los sistemas BRT con respecto a la capacidad que tienen actualmente, y que está determinada por los diseños de rutas que tienen hoy en día.

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

EN ESTE PROYECTO fin de máster se proporciona una introducción a los sistemas BRT en la cual se describen sus elementos principales, se comparan con otros tipos de sistemas de transporte masivo en términos de capacidad, tiempos de implementación, costes de infraestructura y operación, y se nombran sus ventajas y desventajas.

Se da un breve repaso de la situación del transporte en Bogotá antes de la llegada de TransMilenio y se describe en detalle su infraestructura, incluyendo los corredores, estaciones, autobuses y rutas. Se presentan detalles acerca de su operación, tales como velocidades promedio, capacidad, niveles de demanda por parte de los usuarios y aspectos que incrementan la capacidad del sistema.

Posteriormente, se hace una revisión de las diversas propuestas que se han hecho para mejorar la operación de sistemas BRT, incluyendo las que están específicamente dirigidas para la mejora del sistema TransMilenio.

Las distintas propuestas han sido analizadas y se muestran sus ventajas y desventajas. Finalmente, a partir de estas propuestas y de la información recogida en los capítulos anteriores, se propone un nuevo modelo para la optimización sistemas BRT enfocado a TransMilenio.

El modelo propuesto está basado en gran parte en dos de los artículos revisados y además incluye una restricción novedosa que han sido elaborada en este trabajo. Este es un modelo de optimización uniobjetivo que permite minimizar los tiempos de espera de los pasajeros dentro del sistema y los costes operacionales, que puede usarse a la hora de diseñar conjuntos de rutas corrientes y express. Este modelo es novedoso ya que, para nuestro conocimiento, es el único que integra una función de costes para un número cualquiera de rutas, junto con un cálculo detallado de los costes de espera de los usuarios. También contempla los tiempos de ascenso

y descenso de pasajeros a los autobuses, y tiene en cuenta el hecho de que un pasajero puede optar por más de una ruta para llegar a su destino. Las variables de decisión son los tiempos de frecuencia asociados a cada una de las rutas.

La nueva restricción que se propone en este modelo está relacionada con el cuello de botella del sistema, que es la capacidad de vehículos que tiene cada estación. Esta restricción impide que las frecuencias de las rutas sean lo suficientemente altas como para que generen congestión de vehículos en las estaciones, lo cual se traduce en eliminar los tiempos muertos de espera de los autobuses en las estaciones.

Para la elaboración de este modelo se ha contado con el apoyo de expertos de TransMilenio, los cuales nos han suministrado información valiosa y de suma importancia para la elaboración del modelo.

De acuerdo a la revisión de artículos que se llevó a cabo en este trabajo, se puede concluir que son muy pocas las propuestas que se han hecho para optimizar la operatividad de los sistemas BRT. Son menos aún las que se hacen para optimizar los sistemas a través de la inclusión de servicios express. Esto puede deberse a lo reciente que son este tipo de sistemas, ya que antes del año 2000 había tan solo 33 en todo el mundo, que son muy pocos comparados contra los 149 que hay en operación actualmente, además de los 84 que se están planeando o están en construcción. Este bajo número de propuestas significa que hay mucho espacio para la mejora de estos sistemas.

La mayoría de propuestas revisadas se centran en la minimización de los tiempos de espera de los pasajeros y los costes operacionales, pero ninguna busca maximizar la capacidad del sistema a través de la operación. El modelo propuesto aquí está enfocado a maximizar la capacidad del sistema, al impedir que se produzca congestión de vehículos en las estaciones, lo cual se logra imponiendo una restricción. Como ya se mencionó anteriormente, esta restricción es novedosa en el contexto de los sistemas BRT.

Es importante destacar que el trabajo de investigación desarrollado en esta Tesis Fin de Máster ha sido aceptado para ser presentado en el congreso internacional FORS40 - Finnish Operations Research Society 40th Anniversary Workshop, que se celebrará en Lappeenranta (Finlandia) el 20 y 21 de Agosto de 2013, con el título "A First Approach to the Optimization of Bogotá's TransMilenio BRT System" (véase el Anexo 8.1). El congreso incluye revisión por pares de los trabajos aceptados (véase la Tabla 7.1) y el autor de la TFM realizará la presentación gracias a la financiación proporcionada por el Grupo de Análisis de Decisiones y Estadística, a través de los proyectos de investigación que desarrolla (proyecto MTM2011-28983-C03-03).

Finalmente, el objetivo de este proyecto fin de máster no es solamente proponer un modelo que sirva para minimizar los tiempos de espera de los pasajeros y los costes operacionales, sino que también es aportar a la mejora de las ciudades y a la mejora de las vidas de quienes las habitan. Un sistema de transporte lleva cultura a las ciudades, tiene un gran impacto en la vida de las personas, dignifica a las personas y las hace orgullosas (o les genera repudio cuando el sistema no funciona

7.1. TRABAJOS FUTUROS

| Área evaluada | Calificación Revisor 1 | Calificación Revisor 2 |
|---|-------------------------|------------------------|
| Calificación total | 3 (aceptación fuerte) | 2 (aceptado) |
| Confianza del evaluador | 4 (alta) | 3 (media) |
| Relevancia para el congreso | 5 (altamente relevante) | 4 (relevante) |
| Bases teóricas del artículo | 3 (razonable) | 3 (razonable) |
| Metodología | 3 (razonable) | 4 (buena) |
| Validez de los resultados | 3 (razonable) | 4 (buena) |
| Referencias | 4 (buenas) | 4 (buenas) |
| Originalidad | 5 (excelente) | 4 (buena) |
| Interés para el público del congreso | 5 (excelente) | 4 (razonable) |
| Presentación (lenguaje, coherencia, entendibilidad) | 4 (buena) | 4 (buena) |

TABLA 7.1 – Técnicas usadas para la optimización de sistemas BRT.

bien). El objetivo final de este proyecto fin de máster es contribuir a la creación de ciudades más sostenibles y mejores lugares para vivir.

7.1 TRABAJOS FUTUROS

En relación a las líneas de investigación futuras, es necesario destacar que como se menciona anteriormente, hay una muy baja producción de propuestas para optimizar sistemas BRT, especialmente optimización basada en los planes de operación. Este hecho tiene como consecuencia que existan muchas líneas de investigación abiertas, las cuales mencionamos a continuación.

El diseño automatizado de rutas es una línea de investigación en la que se pretende construir un modelo que permita determinar de forma automática cuáles son las estaciones en las que los autobuses se deben detener para poder minimizar los tiempos de espera de los pasajeros y los costes de operación. Tiene como objetivo encontrar un conjunto de rutas y frecuencias las cuales minimicen el tiempo que pasan los pasajeros en el sistemas y los costes de operación. Este conjunto de rutas debe satisfacer las restricciones asociadas a la operación del sistema TransMilenio.

El diseño de una ruta se refiere a establecer un trayecto dentro de las troncales del sistema para los autobuses junto con el conjunto de estaciones en las que se deben detener.

Para TransMilenio, concretamente, no se busca diseñar nuevas rutas, sino que se busca modificar las ya existentes no más de un 30%. Esto significa que los autobuses de cada ruta modificada deben detenerse en al menos el 70% de las estaciones de la ruta original. Este 30% fue determinado después de conversaciones con funcionarios de TransMilenio y es un parámetro más del modelo.

Esto presenta varias ventajas. La primera es que el impacto social de modificar

las rutas no es muy alto, y la segunda es que el espacio de búsqueda de soluciones se reduce en gran medida, por lo que se pueden encontrar mejores soluciones en menor tiempo. Un inconveniente importante es que es posible no encontrar un óptimo global, ya que las mejores rutas pueden tener menos del 70% de estaciones de común con las rutas originales. Pero en este caso es más importante mitigar el impacto social sobre los pasajeros que conlleva el hecho de modificar las rutas.

Los transbordos también son una parte importante en la operación de los sistemas BRT que cuentan con rutas express. Éstos permiten a los pasajeros llegar a su destino cuando no hay una ruta directa desde la estación en la que abordan el autobús hasta su destino. Usualmente, los tiempos de transbordo tienen asociado un coste que incluye el tiempo que tarda el pasajero caminando hasta la plataforma de abordaje y una penalización asociada a la desutilidad experimentada por el solo hecho de tener que cambiar de autobús. En Leiva *et al.* (2010) se presenta una función para calcular los costes asociados a los transbordos. Un trabajo futuro es integrar esta función de coste al modelo aquí propuesto.

Modelar el comportamiento de los pasajeros es un aspecto de suma importancia para poder predecir qué rutas van a tomar los pasajeros. En muchas ocasiones se asume que el pasajero aborda la ruta que lo lleve a su destino en el menor tiempo posible, pero esto no siempre ocurre por diversos motivos, tales como que el pasajero no conoce cual es la ruta que lo lleva en el menor tiempo, prefiere abordar otra ruta menos congestionada para ir sentado, prefiere evitar transbordos, o conoce el sistema y sabe que la frecuencia de dicha ruta es muy baja y prefiere no esperar. Modelizar acertadamente el comportamiento de los usuarios para saber que rutas van a abordar es uno de los retos más grandes que existen. Con dicho modelo se puede llegar a predecir el flujo de pasajeros que aborda cada una de las rutas en escenarios en los que se modifican las frecuencias o se modifica el conjunto de estaciones en los que se deben detener los autobuses de una o varias rutas. La modelización del comportamiento de los pasajeros es una de las áreas menos exploradas dentro del estudio de sistemas BRT.

Contemplar la congestión de pasajeros dentro de las estaciones es otra línea de investigación abierta que no se ha considerado en ninguna de las propuestas revisadas. Predecir con precisión cuántos pasajeros hay dentro de una estación en un determinado instante es de gran utilidad para determinar si hay congestión, lo cual puede afectar en gran medida los tiempos de abordaje y descenso de los pasajeros a los autobuses. Además, en base a esta información se pueden diseñar mejores planes de operación, particularmente en lo que corresponde a la selección de estaciones para realizar los transbordos. Es ideal seleccionar estaciones con poca concurrencia para que los pasajeros hagan transbordos. De esta forma, se evita congestionar más las estaciones con mayor concurrencia.

A la hora de calcular los tiempos de espera de los pasajeros en las estaciones, es importante tener en cuenta que muchas veces sucede que los autobuses llegan llenos a las estaciones y los pasajeros no pueden subirse a ellos. En estos casos los tiempos de espera se ven incrementados, ya que los pasajeros deben esperar al siguiente autobús. No se encontraron propuestas que abordaran este problema en

la literatura, y es un factor a considerar, sobretodo cuando se está estudiando la operación del sistema durante la hora punta.

Con todas las características que hacen parte de los sistemas BRT, pero que aún no se han explorado, es evidente que es necesario ampliar el modelo elaborado en este trabajo para incluir varias de estas características, y de esta forma tener un modelo más robusto, que sea capaz de describir mejor el comportamiento del sistema.

Modelar el problema como un problema multi-objetivo también puede traer varias ventajas a los encargados de poner en marcha los planes operacionales. De esta forma se podrían obtener un conjunto de soluciones que pertenezcan al frente de Pareto y seleccionar la o las que parezcan mejores a quien toma las decisiones. Algunos objetivos que puede considerar quien toma las decisiones son: el tiempo de espera de los pasajeros, los costes operacionales, la capacidad del sistema y el número de transbordos que se realizan.

Como se pudo ver en el Capítulo 5, específicamente en la Tabla 5.2, hay una clara tendencia a utilizar algoritmos genéticos para la optimización de sistemas BRT. Un trabajo futuro consiste en la exploración de otras metaheurísticas tales como optimización por colonia de hormigas, optimización por enjambre de partículas, búsqueda tabú, GRASP, entre otras, para poder compara cuál de ellas se comporta mejor con este tipo de problemas.

Cuando se haya ampliado el modelo y se haya identificado una técnica de solución se podrá llevar a cabo la implementación del modelo propuesto, de la cual se podrán obtener resultados que muestren la calidad de las soluciones que el modelo puede generar. Ésta es una de las tareas que se deja para la futura tesis doctoral.

Finalmente, como se puede ver en este apartado, hay mucho espacio para la mejora de sistemas los sistemas BRT. Este trabajo recoge los avances que se han tenido hasta el momento, propone propuestas de mejora y abre la puerta para trabajar en muchos campos que aún siguen sin explorar.

ANEXOS

8.1 ARTÍCULO PRESENTADO A FORS40

A First Approach to the Optimization of Bogotá's TransMilenio BRT System

Francisco J. Peña, Antonio Jiménez and Alfonso Mateos

Decision Analysis and Statistics Group (DASG)

Departamento de Inteligencia Artificial, Universidad Politécnica de Madrid

Campus de Montegancedo S/N, Boadilla del Monte, 28660, Madrid, SPAIN

Email: francisco.pena.escobar@alumnos.upm.es, {ajimenez, amateos}@fi.upm.es

<http://www.dia.fi.upm.es/grupos/dasg/index.htm>

Abstract—Bus rapid transit (BRT) systems are massive transport systems with medium/high capacity, high quality service and low infrastructure and operating costs. TransMilenio is Bogotá's most important mass transportation system and one of the biggest BRT systems in the world, although it only has completed its third construction phase out of a total of eight. In this paper we review the proposals in the literature to optimize BRT system operation, with a special emphasis on TransMilenio, and propose a mathematical model that adapts elements of the above proposals and incorporates novel elements accounting for the features of TransMilenio system.

Keywords—Bus rapid transit systems, optimization, mathematical modeling.

I. INTRODUCTION

Bus rapid transit (BRT) systems are public transport systems with medium/high capacity, high quality service and low infrastructure and operating costs ([1]). They are considered to be a good affordable alternative for developing cities seeking to provide their citizens with a high-quality possible self-sustaining public transport alternative comparable with rail systems, but without the high costs and without taking cities to high levels of debt, leaving the possibility of investing the city funds in priority areas such as health or education.

BRT systems have a lot in common with rail systems, particularly performance and passenger service. The main difference is that operation and implementation costs are 4 to 20 times lower than the costs of a light rail system, and 10 to 100 times lower compared to a heavy rail and metro system ([1]).

They can operate of limited stop services (also called stop-skipping services), in which a bus service omits stops along certain routes. This has great advantages, such as the reduction of travel times due to fewer stops and the reduction of operator costs because they can meet the demand with fewer vehicles thanks to shorter bus cycles ([2]).

BRT systems are now operating in 149 cities, most of which have been built since 2000, and 84 more are planned around the world. TransMilenio is Bogotá's most important public transportation system and one of the biggest BRT systems in the world. New plans have been made to expand it due to its success, and similar systems have been constructed in other cities of Colombia.

There are very few proposals in the literature focused on optimizing the BRT system operation, mainly because they are relatively recent phenomena, and many of the currently operating BRT systems are far from reaching maximum capacity. To the best of our knowledge, there are not automatic proposals for route design. The closest to this is the model proposed in [2]) that evaluates and selects the best several routes.

In this paper we review of the proposals in the literature to optimize BRT system operation, with a special emphasis on TransMilenio, and propose a mathematical model that adapts elements of the above proposals and incorporates novel elements accounting for the features of TransMilenio system. Specifically, we introduce a new model for evaluating TransMilenio BRT system routes, given the trip demand in the form of an origin-destination matrix.

Section 2 introduces BRT systems and their main elements. Section 3 focuses on the TransMilenio system, Bogotá's most important public transportation system and one of the biggest BRT systems in the world. In Section 4, we review the different studies in the literature on the optimization of BRT systems and, specifically, on the TransMilenio system. In Section 5, we introduce a new mathematical model approach to the optimization of the TransMilenio system. Finally, some conclusions and future research are discussed in Section 6.

II. BUS RAPID TRANSIT SYSTEMS

A BRT system was defined in [1] as a system based on high quality buses, that provide fast and a comfortable urban mobility and with a favourable cost-benefit through the provision of segregated infrastructure of exclusive use, fast and frequent operations, and marketing and customer/user service excellence.

The first BRT system started operating in Curitiba in 1974, but until the decade of 1990 this type of system was seen as a public transportation system for small cities or as complementary systems of a metro network. Many experts considered that these systems were not able to reach a capacity beyond 12000 passengers per hour per direction (pphpd). This perception radically changed in 2000 with the creation of TransMilenio in the city of Bogotá (Colombia). Nowadays, TransMilenio transports nearly 500 million people yearly ([3]). It introduced a series of improvements that raised the capacity of BRT systems enormously to 45000 pphpd, and has inspired

BRT and busway systems in the world

➤ evolution of the # of cities and km per decade

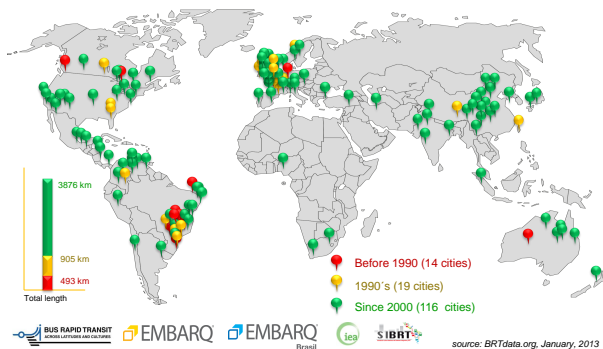


Fig. 1. Evolution of number BRT of cities and km per decade ([4])

many cities around the world to implement this type of systems ([1]).

Nowadays, there are 149 cities with BRT systems, and 84 more are planned. The majority of systems were built after the year 2000, which can be attributed to TransMilenio's success, as illustrated in Figure 1, which shows the evolution in the number of cities with BRT systems per decade and the respective number of kilometers.

A. Comparison with other mass transportation systems

Table I shows the price range for mass transportation systems based on a comparison of infrastructure costs real data ([1]).

| Type of system | Cost per kilometer (US\$ million/km) |
|-----------------------------|---|
| BRT | 0.5 - 15 |
| Tram and light rail transit | 13 - 40 |
| Elevated systems | 40 - 100 |
| Underground metro | 45 - 350 |

TABLE I. CAPITAL COSTS FOR DIFFERENT MASS TRANSPORTATION SYSTEMS

The infrastructure costs for BRT systems are clearly significantly lower than for any other rail-based transportation system. The city of Bangkok is a case in point. This city has an elevated rail system (SkyTrain) and an underground metro system (MRTA), a proposed BRT system (Smartway) and a proposed light rail train. The real costs per kilometer of the metro systems and elevated train were US\$ 142.9 million and US\$ 72.5 million. The projected costs per kilometer for the proposed light rail and BRT are US\$ 25 million and US\$ 2.34 million. This means that with a budget of US\$ 1000 million they could build 7 km of underground train, 14 km of elevated train, 40 km of light rail train or 426 km of BRT system ([1]).

Unlike rail systems around the world, BRT systems are capable of operating without government subsidies. As a matter of fact, they are profitable, which is the reason why many governments delegate the operation to private companies. This is a great advantage, especially useful for developing cities, where governments have tight budgets and there is

nothing better than a self-sustaining mass transportation system thanks to which they can invest resources in other areas such as sewerage, education and health.

BRT systems can be planned and implemented in short time periods, which can be covered in one government term. The two most successful and complete BRT systems (Curitiba and Bogotá) were planned and implemented in a three year span.

Formerly it was thought that bus based services could operate within a range up to 6000 pphpd. If the demand was higher, a light rail based system should be considered, with capacity between 6000 and 12000 pphpd. A heavy metro system had to be considered for a higher demand, since its capacity ranges from 25000 to 80000 pphpd.

The arrival of BRT systems with a capacity range from 3000 to 45000 pphpd changed the situation. BRT systems turned into a real mass transportation alternative for big cities, and the myth that says that BRT system cannot compete with metro systems in terms of capacity was broken. As a matter of fact, it is not necessarily true that big cities need overflowing levels of capacity, an example is the London metro system, which has a capacity of 30000 pphpd, but thanks to its multiple parallel lines it has distributed corridors demand across the entire transportation network. An opposite case is Hong Kong's metro, whose capacity is 80000 pphpd and there is only one line from Kowloon and New Territories to Nathan Road. But the high level of demand is what makes this metro system profitable ([1]).

B. Main components of a BRT system

A BRT system has seven main components ([5],[6]): busways, stations, vehicles, fare collection, intelligent transportation systems, service and operation plans, and branding elements.

The *busways* or *corridors* are the main component of the BRT systems and it is where the vehicles circulate; they are like the rails of a metro system. They are also the most expensive and one of the most visible elements of the whole system. Therefore, they have a direct impact on the image and perception the users have of the system ([6]). The busways must be exclusive for the system buses. Furthermore, the busways must be located in the center and not at the side of the road ([1]).

The *stations* are the link between the passengers, the BRT system and other transportation systems. They are the element that has most influence on system image, and so, they must have comfortable facilities so that the passengers feel at ease. The stations must accommodate many more people than a bus stop, so they must have a wide infrastructure ([6]) since they are located in high demand busways. Besides, the stations must protect the users from climate conditions. The boarding platforms must be at the same height as the buses floor to ease and speed up passenger' access. There must be also large capacity header stations at the ends of each busway to integrate busways and feeder routes [1].

The *vehicles* are the system's element in which the passengers spend most of their time. They have a direct impact on speed, capacity, comfort and environment friendliness. They

are the element that most non-users see, becoming one of the elements with most influence over the public's perception of the system ([6]).

Currently, there are three types of vehicles: articulated, bi-articulated and simple. *Articulated buses* have the capacity for 160 passengers and operate within the busways. *Bi-articulated buses* have the capacity between 240 and 270 passengers and operate within busways. *Simple buses* have the capacity for 90 passengers and in some cities they operate only in mixed traffic corridors as feeder routes. In other cities with low capacity BRT systems operate in busways.

Fare collection has a direct effect on capacity and the system's income. If fares are collected outside the bus, it decreases passenger waiting time through bus boarding efficiency. This is especially useful for bus routes that have high levels of demand ([6]). The fare may be collected outside the bus at the station entrance. Furthermore, fares should be integrated, that is, users should be able to transfer from one bus route to another, including feeder routes, without having to pay an extra fare [1].

The *intelligent transportation system* is a technological component that helps to improve overall system performance. It is a combination of different technologies to retrieve all kind of data about system operation, from the number of passengers that enter the system to the positioning of every vehicle using GPS, vehicle departure times, traffic conditions, the traffic lights, etc. The goal of this component is to collect and transform all the possible information into useful knowledge for operators, and ultimately benefits for the passengers.

The *service and operation plans* directly affect the user's perception of the system. A good plan allows to adjust to the levels of demand present along the busways. Frequencies should be high to reduce waiting times, and a good design will also help to reduce the number of passenger transfers. Furthermore, the route maps must be easy to understand for users [6]. The busway and feeder routes must be physically integrated, forming a network. Besides, the entry of other public transport operators must be restricted ([1]).

The BRT systems must have a distinctive *brand* image from other transportation systems. A good marketing strategy can position the brand and improve its image to attract more users. The BRT system should have a positive brand image.

III. TRANSMILENIO BRT SYSTEM

TransMilenio is Bogotá's most important mass transportation system and one of the biggest BRT systems in the world. It is based on the Curitiba BRT system, and there are new plans for its expansion, due to its success. Similar systems have been constructed in other Colombian cities. Currently, the system has completed its third construction phase out of a total of eight.

A clear definition of TransMilenio is given in [7]: "TransMilenio is defined as an urban mass transportation system that privately operates high capacity articulated buses that circulate through segregated busways, which are integrated into a system of feeder services that cover circular peripheral services with medium capacity buses. The system has stations with platform level boarding and automatic doors synchronized with the

buses, where passengers take or get off the buses and the service is limited for those who have bus tickets. A satellite control system permanently supervises the buses, and the one-payment fee allows the passenger to board both busway and feeder services".

A. Infrastructure

TransMilenio's infrastructure is composed of three fundamental elements without which operation would be impossible: busways, stations and buses.

TransMilenio buses circulate on exclusive roads called *busways*. Currently the system has 11 busways with a total length of 104.6km ([8]). There are two types of busways: one lane and two lanes busways. The one-lane busways have passing lanes at stations so that buses can pass each other, thereby providing for express routes. The busways are located on the city's main roads and are physically separated from the mixed traffic lanes. The busways are in the central lanes of the roads [8], [7]. Internal rules of circulation and operation control can be imposed to improve system performance because the lanes are used exclusively by buses.

As a complement for the buses that circulate on busways, there are lower capacity buses that circulate on the other roads of the city. These routes are called *feeder routes* and have predefined stop points ([9]).

TransMilenio has a total of 143 *stations*. These stations form the area where the users can move and board bus routes (the "paid area"). The station platforms are at the same height as the bus doors, and that makes it easy to board the buses ([8], [7]). There are three types of stations: portal, intermediate and standard. The *portal stations* are the main stations of the system and are located at the ends of each busway. They are the starting and final destination points for the buses. Furthermore, they have access to feeder routes, which depart from and arrive at these stations like the busway routes. In this way, the transfer between routes becomes easier. The *intermediate stations* are similar to the portal stations (passengers can transfer between busway and feeder routes) but are located at intermediate points of the busways and not at the ends ([8]). The *standard stations* are smaller than the other two and only allow access for busway routes. They are located along the busways with an average separation of 500 meters. Their size varies and they can serve 1, 2 or 3 buses simultaneously in each direction.

TransMilenio has three types of *busway services*: normal, express and super-express. The *normal services* are routes that stop in all stations along the way. They have a higher frequency than the other types of services. The *express services* stop only at some stations (from 40% and 60%), and have a higher average speed than normal services. The stop plan of these services has been designed according to the levels of demand of the stations along the busway ([9]). The *super-express services* are very similar to the express services. The only difference is that they stop at fewer stations (about 20%) of the stations along the busway. These services are better for users that have long journeys because they stop at few stations ([9]). Currently, TransMilenio has 1392 busway buses (articulated or bi-articulated) and 574 feeder buses.

B. Speed

System buses operate at average speeds of 19 and 32 km/h for normal and express services, respectively ([9]).

TransMilenio increased the average speed of the city's corridors. For instance, the *Caracas* corridor had speeds of 12 km/h and *Calle 80* of 18 km/h due to the oversupply of private bus operators that there was before TransMilenio and which generated traffic jams.

TransMilenio system has an average speed of 26 km/h ([9], [1], [3]). This means that the average speed of public transport increased by 15 km/h after TransMilenio was implemented.

Nevertheless, the speeds are not the same in all busways for different reasons, such as the number of traffic lights along the busways, the number of lanes and even the type of material the street is made of [10]. For example, the *Eje Ambiental* busway, is a cobbled road in the historic center of the city. Table II shows the average bus speeds on the major busways of TransMilenio.

| Busway | Speed (km/h) |
|--------------------|--------------|
| Eje Ambiental (EW) | 9.07 |
| Eje Ambiental (WE) | 10.51 |
| Caracas (SN) | 22.05 |
| Caracas (NS) | 22.61 |
| Caracas Sur (NS) | 24.82 |
| Suba (SN) | 24.95 |
| Suba (NS) | 25.08 |
| Calle 80 (WE) | 26.59 |
| NQS Sur (NS) | 27.32 |
| Caracas Sur (SN) | 28.17 |
| Américas (EW) | 28.24 |
| Américas (WE) | 28.37 |
| Calle 80 (EW) | 29.27 |
| Autonorte (NS) | 31.21 |
| NQS Central (NS) | 32.80 |
| Autonorte (SN) | 33.12 |
| NQS Sur (EW) | 33.18 |
| NQS Central (SN) | 36.87 |

TABLE II. AVERAGE BUSWAY SPEEDS IN TRANSMILENIO

C. Capacity

TransMilenio has a maximum load capacity of 45000 passengers per hour per direction (pphpd), the highest-capacity BRT system in the world and even outperforming many heavy rail or metro systems ([1], [10]), see Table III.

| Line | Type | Ridership (passengers/hour/direction) |
|-----------------------------|---------------|---------------------------------------|
| Hong Kong Subway | Metro | 80000 |
| São Paulo Line 1 | Metro | 60000 |
| Mexico City Line B | Metro | 39300 |
| Santiago de Chile La Moneda | Metro | 36000 |
| London Victoria Line | Metro | 25000 |
| Madrid Metro Line 6 | Metro | 21000 |
| Buenos Aires Line D | Metro | 20000 |
| Bogotá TransMilenio | BRT | 45000 |
| Sã Paulo 9 de julho | BRT | 34910 |
| Porto Alegre Assis Brasil | BRT | 28000 |
| Curitiba Eixo Sul | BRT | 10640 |
| Manila MRT-3 | Elevated rail | 26000 |
| Bangkok SkyTrain | Elevated rail | 22000 |
| Kuala Lumpur Monorail | Monorail | 3000 |
| Tunis | LRT | 13400 |

TABLE III. MAXIMUM CAPACITY OF MASS TRANSPORTATION SYSTEMS AROUND THE WORLD

The *transit capacity and quality of service manual* ([11]) defines the capacity of any route or public transport corridor as “the maximum number of people that can be carried past a given location during a given time period under specified operating conditions without unreasonable delay, hazard, or restriction, and with reasonable certainty”. This capacity is measured in number of passengers per hour.

A system's capacity is limited by the component with least capacity (i.e., the bottle neck). The three key components of the BRT systems are buses, whose capacity is measured in number of passengers; stations, whose capacity is measured in number of passengers and buses; and busways, whose capacity is measured in number of buses. Whichever of these three components has the least capacity will become the factor that controls the system corridor. Several authors agree that BRT systems capacity is most often limited by the stations ([9], [10], [1]).

As mentioned before, TransMilenio has two types of buses that operate on the busways, articulated buses and bi-articulated buses. Table IV shows the number of passengers that each type of vehicle can carry in a one-lane busway and with one boarding platform stations, the average time that a vehicle occupies a given boarding platform (dwell time) and the average boarding time. TransMilenio increases the system capacity by using multiple boarding platforms in each station [1].

| Type of vehicle | Maximum vehicle capacity (passengers) | Average dwell time (seconds) | Average boarding & alighting time (seconds) | Corridor capacity (pphpd) | Vehicle capacity (vehicles/hour) |
|-----------------|---------------------------------------|------------------------------|---|---------------------------|----------------------------------|
| Articulated | 160 | 13 | 0.3 | 9779 | 61 |
| Bi-articulated | 240 | 14 | 0.3 | 12169 | 51 |

TABLE IV. VEHICLES AND PLATFORM CAPACITIES

Articulated buses carried an average of 1596 passengers in 2006, which is five times the average number of passengers carried by traditional buses. Furthermore, the number of kilometers a bus travels has increased due to the expansion of the busways, the extension of operating hours and the increase of express services. Each bus travelled 370 km daily in 2006 ([9]).

TransMilenio was the first BRT system to include multiple boarding platforms inside each station. In this way, it reached levels of capacity that only heavy rail systems had ([1]). Some TransMilenio stations may have up to five different platforms, each used for a different route.

There are reasons for including multiple platforms in a station [1]. The first one is to offer different types of services, such as normal and express, which can be allocated to different platforms. The second, and most important, is to reduce the saturation levels at stations, which helps to improve the service.

Besides, it is possible to distribute the different routes along each platform in such a way that each route stops only at one platform. It is then easier for users to find routes, because the user will associate each bus route with a platform.

In theory, one station with five platforms may have five times the capacity of a station with only one platform ([1]). To make this possible, the platform saturation level should be between 40% and 60%.

A TransMilenio capacity study was conducted in 2007 ([10]) and revealed which capacity values could be achieved according to the number of boarding platforms at each station, see Table V. Note that it is assumed that each platform has space to keep a vehicle in line (storage space).

| Type of station | Recommended saturation (%) | Capacity (vehicles/hour) |
|---|----------------------------|--------------------------|
| Station with one boarding platform and no storage space | 40 | 48 |
| Station with one boarding platform with storage space | 60 | 72 |
| Station with two boarding platforms and no storage space | 40 and 40 | 96=48+48 |
| Station with two boarding platforms, one with storage space and the other one with no storage space | 40 and 60 | 120=48+72 |
| Station with two boarding platforms with storage space | 60 and 60 | 144=72+72 |
| Station with three boarding platforms where just one of them has storage space | 40, 60 and 60 | 192=48+72+72 |
| Station with three boarding platforms with storage space in each | 60, 60 and 60 | 216=72+72+72 |
| Station with four boarding platforms with storage space in each | 60, 60, 60 and 60 | 288=72+72+72+72 |

TABLE V. STATIONS CAPACITY ACCORDING TO THE NUMBER OF PLATFORMS ([10])

In BRT systems, the busway capacity is much higher than the station capacity. Bogotá's City Council *transit and transport administration manual* ([12]) states that the saturation flow of the busways is reached when there are between 692 and 750 articulated buses per lane. The interval is between 470 and 730 for right turns and between 465 and 735 for left turns. Note that this capacity does not contemplate elements such as intersections or traffic lights. It is clear that the busways capacity is much greater than the stations capacity.

The basic capacity of each busway is equal to the least capacity station along the busway ([10]). It does not account for questions that may increase system performance, such as express routes. The values for the different busways are (*Calle 26* and *Carrera décima* busways are not considered since they were opened after the date of the study) ([10]):

- *Caracas Centro* Busway: 192 buses/hour.
- *Autopista Norte* Busway: 144 buses/hour.
- *Avenida Suba* Busway: 144 buses/hour.
- *Calle 80* Busway: 48 buses/hour.
- *NQS* Busway: 72 buses/hour.
- *Américas/Calle 13* Busway: 144 buses/hour.
- *Eje Ambiental* Busway: 72 buses/hour.
- *Caracas Sur* Busway: 96 buses/hour.
- *Caracas Sur ramal Tunal* Busway: 72 buses/hour.

IV. EXISTING STUDIES

There are very few proposals in the literature that focus on optimizing the BRT system operation. This can be explained because BRT systems are relatively recent (until the year 2000 there were only 19 BRT systems in the world ([4])). Another

possible reason could be that many of the currently operating BRT systems are far from reaching their maximum capacity. For instance, none of the BRT systems operating in USA has reached maximum capacity and all of them have plenty of space for expanding their operation capacity ([6]).

Nevertheless, there are very interesting proposals that can be used as a starting point to propose a model for optimizing the operation of TransMilenio. To the best of our knowledge, there are no automatic route design proposals. The closest to this is the model proposed in [2]) that evaluates and selects the best several routes.

In the following we review of different proposals in the literature to manage and optimize the operation of different BRT systems and, specifically, for TransMilenio.

A. Proposals for optimizing of BRT systems

Most of the proposals in the literature for optimizing BRT systems are based on bus scheduling and are focused on varying the times between each bus departure (i.e., the headway) of the different bus routes.

In [13] a model for optimizing BRT systems is proposed on the basis of two elements, the headway, which is assumed to be uniform, and the order in which the bus routes depart.

The optimization model is characterized by a set of predefined bus routes (normal, zone and express routes). A random number is generated and assigned to the headway. Then, the algorithm finds an optimal solution to the order in which the routes have to depart that minimizes a cost function. For instance, the algorithm may determine that for a headway of 5 minutes the best departure order is [normal, express, express, normal, zone]. This solution means that a normal bus route should depart at minute 0, an express route at minute 5, a normal route at minute 10 and an express route at minute 15 and a zone route at minute 20. This solution may be better than for example [express, express, zone, express].

The cost function accounts for the passengers waiting at the stations, the waiting time inside the buses and the operating costs. It is very complete and includes several variables, such as the number of boarding/alighting passengers by station, the stops of each route, the monetary value of the waiting time costs and the vehicle operating costs, among others.

The model chooses a headway for the given routes and shuffles the order of departure. A genetic algorithm is used to reach an optimal solution. The article presents a novel codification that is a vital element for the model and includes a combination of the headway and route design variables.

In [14] a very complete model is proposed, with good granularity and with greatly detailed costs. An application to Line 2 of the BRT in Beijing is used to illustrate the model. The total cost of a solution accounts again for passenger waiting time at the station, passenger waiting time inside the bus, and the vehicle operating costs. Passenger walking time from home/office to the station is excluded, because bus scheduling has no influence on that time.

The model considers variables such as the bus departure frequency, the distance between stations, average speed between stations, the rates and boarding times, acceleration

and deceleration times, the number of traffic lights between stations, the traffic lights cycle times and others. Furthermore, it assumes that the waiting time is equal to half of the frequency time or headway.

Fixed costs are removed from the analysis because they are unaffected by bus scheduling. The variable costs are composed of operating cost per kilometer, operating hours, vehicle depreciation, etc.

The decision variables in the optimization model are the route headway and binary variables that represent whether or not stations are skipped. The model seeks to minimize the total costs and is subject to capacity constraints, vehicle availability and headway limitations. To accomplish this of an all-stop route and an express route is combined and their headways are calibrated to minimize the total costs.

The algorithm complexity increases exponentially along with the number of stations, and this is the main reason why the authors use a genetic algorithm (it would be too costly to use a deterministic algorithm). Another reason is that genetic algorithms are able to naturally represent binary variables.

[2], [15], [16] introduce an optimization model for the minimization of waiting time, travelling time and operating costs for an express bus service, given the travel demand. A mathematical model is built to minimize costs given a set of stations, the distance between stations, the passenger origin-destination matrix and a set of *a priori* attractive set of routes. For each suggested route the model outputs the frequency of the services and the size of the buses to use.

For the construction of this model the travel demand is assumed to be fixed and known, represented by a origin-destination matrix for the analyzed stations, which must be satisfied. It is also assumed that passengers arrive at an average fixed rate, passengers choose the route to their destination that minimizes travel time and there is no limit on the available vehicle fleet.

The operating costs are computed on the basis of the cycle cost of a full bus route, the frequency of each route and the operating set of routes. The passengers costs are given by the waiting time at stations, travel time and transfer time.

There are also various proposals to improve the operation of BRT systems through the prioritization of transit signals. [17] describes the mathematical relationship between the departure frequency of a route, the cycle length of the transit signals and the number of different signal states when the buses arrive at an intersection. It proposes various strategies for prioritizing signals that decrease the headway time deviation, i.e., decrease the punctuality deviation of the buses, without having a significant impact in the delay of the mixed traffic.

Other proposals that study the priority control of signals in BRT systems can be found in [18], [19], [20], [21].

B. Proposals for the optimization of TransMilenio

Since the construction of TransMilenio in the year 2000, various proposals have been made to optimize its operation. Most of these proposal focus on the reduction of systems costs, to strike a balance between passengers waiting time and operating costs.

For instance, Petri networks are used to model TransMilenio in [22]. The proposed model is classified as a macroscopic deterministic simulation model, due to its detail level, process and operation representation. The model uses a multiagent approximation to model three important system components: the passenger behavior (how many passengers take the bus per hour), the busway dynamics, and the interaction between the passengers and the buses. Since Petri networks are unable to deal with time, trigger times are added to the nodes to represent temporal relationships.

Three busways are modeled, *Avenida Caracas*, *Autonorte* and *Avenida de las Américas*. The model includes the seven most important stations out of a total of 45 on these busways. Moreover, three routes (a normal route, an express route and a super-express route) that stop at the same stations on their back and forth trips were chosen.

Two Petri networks are designed. One models the whole system and randomly assigning buses to routes, and the other separates the routes from the buses. Random models have the advantage of being able to simulate the interaction between routes. The random model outperforms non-random models to satisfy the demand with the minimum number of resources. Finally, the random model works as an integrated system and it is capable of solving perturbation by itself. The result of this simulation shows that there is a point at which adding more buses to the system does not improve the performance.

In [23] a genetic algorithm is used to find the best frequency for pre-established bus routes that minimizes passenger waiting time. The frequency is determined by the assignment of buses to each route. The model tries to minimize the time the passengers spend on the system, which is composed of the travel time plus the waiting time at the stations.

The genetic algorithm chromosome size is equal to the number of routes and the population is initialized randomly with the constraint that each route has at least one bus assigned. A random matrix is also created along with the initial population, this matrix contains all origin-destination trips. This algorithm assumes the user is "smart" and will always choose the best route to go to his/her destination.

The arrival of buses at the station and the passengers waiting time are modeled by a Poisson process and a distributed Erlang event, respectively. It accounts for the scenario where buses are full and passenger cannot board. In these cases the passengers have to wait to the next bus.

A graph with the routes was designed to measure the time, where each node represents a station and the arcs represent the connections between them. The arc costs are the travel time between the stations that the arcs connect. Additionally, arcs with the possible express routes are included. Dijkstra's algorithm is then used to compute the shortest routes, and it is executed before running the algorithm.

In [24] a model to evaluate TransMilenio routes is built based on the data provided by a origin-destination matrix. The trip probabilities between stations and passenger arrival rate to each station are computed from this matrix, assuming that the users know which is the best route to reach their destination. The model is implemented in a commercial simulation software package.

The model includes a set of constraints regarding user behavior when choosing their route to reach to their destination. The input data for the evaluation algorithm are the origin-destination pairs, the stops of each service and the quantity of passengers associated with each pair. TransMilenio data is also required, such as existing routes, their frequency, vehicle capacity, speed, the distance between stations and other network characteristics.

The model is composed of three modules. The network module stores information about the physical infrastructure, such as stations, the distance between them, busways, and others; the stations module is in charge of the boarding and alighting at each station and the arrivals module assigns passenger origin and destination.

The time that the passenger spends inside the station is given by the travel time, the bus stopping time and passenger waiting time at the station. The bus arrival times are assumed to be uniform. Therefore, the waiting time of each passenger is equal to half of the route's headway.

C. Analysis of proposed models

Most of proposed models are far from being able to represent what goes on in the real world because they are not detailed enough to represent what happens within a BRT system. We are going to describe the advantages and drawbacks of each model.

The model presented in [23] does not account for vehicle operating costs. This fact is clearly reflected in the results, where the best solution is to increase bus departure frequencies and use the entire bus fleet. The models do not adequately represent constraints concerning capacities within the system, which is modeled for the whole corridor but not for each station individually. This overlooks the fact that there are some stations that have more demand than others. The model does not account for deceleration and acceleration times, passengers boarding and alighting times or dwell times at signalized intersections. An advantage of this proposal is that it builds a graph that pre-calculates the travel times between each pair of stations for each route. This is helpful to find the optimal route between two stations.

The model presented in [22] has several voids, such as the fact that it does not account for passenger waiting time or vehicle operating costs. Neither does it account for passenger congestion within the stations, vehicle congestion at stations, discriminated speeds between each pair of stations, or assign distribution times to passenger and vehicle arrivals at stations. On the other hand, it has several advantages, such as considering that when buses are full passengers must wait for the next bus. The model is a user-friendly graphic tool that can model a system in which equations are not known.

The model presented in [24] refers to some important constraints but the model does not include any. Other constraints included as assumptions are not necessarily realistic. For instance, it is assumed that if a passenger is going to make a trip that is 5 or less stations of long, he/she will only take normal (all-stops) services. It does not consider decelerating and accelerating times, passenger boarding and alighting times or dwell times at signalized intersections either.

The model presented in [13] assumes the same speed between every pair of stations, which is not realistic. It does not consider the bus passenger capacity, vehicle capacity at the stations and passenger capacity at the stations either. Waiting times at signaled intersections are not considered either. A major drawback of this model is that it uses the number of passengers that board and alight from buses at each station rather than an origin-destination matrix as input. This demand data is not detailed enough to identify passenger behavior. The model accounts for passenger waiting times and vehicle operating costs. The introduction of an innovative variable-size codification and the use of binary variables to indicate whether or not a bus stops at a station.

The model presented in [14] is one of the most complete. In fact, it incorporates most cost variables. It is the only model that includes passenger boarding and alighting times and the stop times at the signaled intersections. Nevertheless, it has some drawbacks. For example, it only considers one express route, i.e., scenarios with several express routes cannot be evaluated. The model is aimed at reaching the best departure frequency for a normal and an express route that operate along the same busway. Its parameters are the origin-destination matrix, the stations in which the express routes stops and the bus fleet size. Note, finally that the model does not consider vehicle congestion or passenger congestion at stations.

The model presented in [2] is also very complete and perhaps the best at representing the costs of a real BRT system. This is accomplished thanks to the inclusion of several express routes on one busway and because it is good at differentiating travel time and operating costs. But it is not free of drawbacks. For instance, it does not include acceleration and deceleration times, boarding and alighting times or stop times at signaled intersections. The proposed model searches the departure frequencies that optimize BRT operation according to a defined cost function.

In summary, none of the reviewed proposals considers vehicle congestion at stations or passenger congestion at stations. This is worrying, because, as stated in [9], [10], [1] the capacity bottleneck of a BRT system is the vehicle capacity at the stations. There are not many proposals that account for this point because hardly any BRT systems have reached maximum capacity, which could be the reason why the proposals have focused mainly on the minimization of passenger waiting times an operating costs, and not on the increase of system capacity.

We found that none of the proposals offer automated route design. [14] and [2], which offer validation models for routes that can be given to the model as a parameter, come the closest. We also found that none of the proposals take a multi-objective approach to the problem.

V. PROPOSED OPTIMIZATION MODEL FOR TRANSMILENIO

In the previous section we reviewed the proposals in the literature for optimizing BRT system operation, with an special emphasis on the TransMilenio system. In this section, we provide a mathematical model for the optimization of TransMilenio that adapts elements of the above proposals, mainly [14] and [2], and incorporates novel elements accounting for the features of that system.

The problem is to find departure frequencies for the established routes that minimize the time passengers spend inside the system and operating costs. This set of frequencies must satisfy the constraints associated with the TransMilenio operation. The problem is analysed only during the rush hour time window.

A. Available information

The *set of stations* determines the size of the BRT system. The number of stations is directly related to the complexity of the problem to be solved. Information about the system stations, the busways to which they belong, and each station's neighboring stations must be considered. The set of TransMilenio stations is denoted by $E = \{e_1, \dots, e_{143}\}$, where e_i refers to the i -th station, $i = 1, \dots, 143$.

The *routes* are paths between two stations (usually main stations) that buses must take and are composed of the set of station at which buses must stop. The set of TransMilenio routes is denoted by $R = \{r_1, \dots, r_{90}\}$, where r_j is the j -th route, $j = 1, \dots, 90$.

The *station vehicle capacity* is very important, even more so in cases where nearing full capacity the BRT system is, like the TransMilenio system. When the system is nearly at maximum capacity the problem is to find feasible solutions that can meet the trip demands. The station vehicle capacity e_i is denoted by $k_{e_i}^s, i = 1, \dots, 143$.

The information required about the *buses* is their capacity and the quantity of buses in operation. We assume that the buses operating along each route have the same capacity. This information is important in order to impose capacity constraints within the buses and to prevent to operate with more buses than the available. The bus capacity is denoted by $k_{r_j}^b, j = 1, \dots, 90$ which is the passenger capacity of the vehicles that operate the r_j -th route.

The *distance between stations* is used to compute the travel times between each pair of stations. $d_{e_i e_j}$ denotes the distance between stations e_i and $e_j, i, j = 1, \dots, 90$.

Speeds between each pair of stations are very important because not all busways have the same characteristics and therefore the speed is not always the same. Some busways have signaled intersections, whereas others are built over highways where they can travel at faster speeds. The speed between the stations e_i and e_j is denoted by $s_{e_i e_j}$.

Acceleration and deceleration times along with boarding and alighting times are used to compute the total time of a stop at a station. These values are constant and independent of passenger demand level in the system. Based on the model proposed in [14], we assume that the times are the same for all stations. The acceleration and deceleration times are denoted by p .

The *boarding and alighting times* are used to determine the total stop time of a bus at a station. The stop time increases with the amount of people that board or alight the bus. Based on the model proposed in [14], we can calculate passenger boarding time at a station as $\alpha_{e_i}^{r_j} \times \tau^\alpha$, where $\alpha_{e_i}^{r_j}$ is the passenger boarding rate for route r_j at station e_i and τ^α is the passenger boarding time. In the same way, the alighting time is denoted by $\beta_{e_i}^{r_j} \times \tau^\beta$, where β is used for alightings.

Costs are usually divided into passenger waiting time costs and the BRT system operating costs. The model that we propose accounts for three types of costs: waiting time at stations, waiting time on buses and vehicle operating costs. Fixed costs, such as station cleaning, electricity, administrative wages, rents, and others, are not considered because they are independent of the BRT system operation ([14]). The unit cost per kilometer, the unit cost for waiting time at the station and the unit cost for waiting time inside the buses, are denoted by μ_O, μ_S and μ_B , respectively. These values are used in the cost function to evaluate the quality of the sets of routes.

The *origin-destination matrix* contains information about passenger demand, i.e., the amount of users traveling from station e_i to station e_j . We use an origin-destination matrix with rush hour data, because this is the time window when the system is closer to maximum capacity. The number of passengers that travel from station e_i to station e_j is denoted by $q_{e_i e_j}$.

Operating hours is the time during which the BRT system is operating, denoted by T .

B. Decision variables

The decision variables for the proposed model are the frequencies associated with each route. The set of frequencies is denoted by $F = \{f_1, \dots, f_{90}\}$, where f_{r_k} is the frequency for the buses of the k -th route. The frequencies identify how often the buses of a given route depart. The headways can be computed from the frequencies and vice-versa.

C. Cost function

Multiple authors (see [14], [2], [13]) agree that the cost function, C , is composed of the sum of three elements: vehicles operating costs, C_O ; passenger waiting time at station costs, C_S , and passenger travelling time costs, C_B . These last two costs can be grouped as the passenger total trip costs ([14]).

Then, the function to be optimized (minimized) is:

$$\min C = C_O + C_S + C_B,$$

The operating costs can be calculated by:

$$C_O = \mu_O \times \sum_{r_k \in R} T \times f_{r_k} \times D_{r_k},$$

where μ_O is the unit cost per kilometre for a BRT vehicle, R is the set of all routes in the system, T is the BRT system operating hours, f_{r_k} is the frequency of route r_k and D_{r_k} is the length of the path covered by route r_k . D_{r_k} can be computed from the distances ($d_{e_i e_j}$) between the consecutive stations included in the k -th route.

The waiting time at station costs can be computed as follows:

$$C_S = \mu_S \times \sum_{e_i, e_j \in E} q_{e_i e_j} \frac{\epsilon}{\sum_{r_k \in R} f_{r_k} \times x_{e_i e_j}^{r_k}},$$

where μ_S is the waiting time unit cost, $q_{e_i e_j}$ is the passenger trip demand for the (e_i, e_j) origin-destination pair, f_{r_k} is the frequency of route r_k , $x_{e_i e_j}^{r_k}$ is a binary variable that indicates

whether a route r_k is a good option for travelling from the station e_i to the station e_j (its value is 1 if the route is attractive and 0 otherwise), and ϵ is the bus arrival distribution at the stations, which are assumed Poisson distributions.

The travel time costs can be computed by:

$$C_B = \mu_B \times \sum_{e_i, e_j \in E} q_{e_i e_j} \times \frac{\sum_{r_k \in R} t_{e_i e_j}^{r_k} \times f_{r_k} \times x_{e_i e_j}^{r_k}}{\sum_{r_k \in R} f_{r_k} \times x_{e_i e_j}^{r_k}},$$

where μ_B is the travel time unit cost, f_{r_k} is the frequency of route r_k , and $t_{e_i e_j}^{r_k}$ is the travel time in route r_k for the (e_i, e_j) origin-destination pair, with

$$t_{e_i e_j}^{r_k} = t_{e_i e_j}^{1r_k} + t_{e_i e_j}^{2r_k},$$

where $t_{e_i e_j}^{1r_k}$ and $t_{e_i e_j}^{2r_k}$ are the travel time and delay time from station e_i to station e_j ,

$$t_{e_i e_j}^{1r_k} = \frac{d_{e_i e_j}}{s_{e_i e_j}},$$

$$t_{e_i e_j}^{2r_k} = \left(\frac{\sum_{e_i \in P_{r_k}} \alpha_{e_i}^{r_k} \times \tau^\alpha}{f_{r_k}} + \frac{\sum_{e_i \in P_{r_k}} \beta_{e_i}^{r_k} \times \tau^\beta}{f_{r_k}} \right) + N_{e_i e_j} \times d,$$

and

- $d_{e_i e_j}$ and $s_{e_i e_j}$ are the distance and average speed between station e_i to station e_j , respectively,
- $\alpha_{e_i}^{r_k}$ and $\beta_{e_i}^{r_k}$ are the boarding and alighting rates at station e_i for route r_k , respectively,
- τ^α and τ^β are the boarding and alighting times per passenger,
- $N_{e_i e_j}$ is the number of stations between station e_i and station e_j ,
- P_{r_k} is the set of stations at which route r_k stops,
- p is the acceleration and deceleration delay at station.

D. Constraints

The *bus passenger capacity* constraint ensures that the frequency of bus departure is high enough to prevent overcrowding inside the buses. If this constraint is not applied, buses may be full when they arrive at stations, passengers will have to wait for the next bus.

$$k_{r_k}^b \times f_{r_k} \geq \sum_{e_i \in P_{r_k}} \sum_{e_j \in P_{r_k}} q_{e_i e_j} \times \frac{f_{r_k} \times x_{e_i e_j}^{r_k}}{\sum_{r_m \in R} f_{r_m} \times x_{e_i e_j}^{r_m}},$$

$\forall r_k \in R, \forall a \in P_{r_k}$, where

- $k_{r_k}^b$ is the passenger capacity of the buses circulating along route r_k ,
- f_{r_k} is the frequency of route r_k ,
- P_{r_k} is the set of stations at which route r_k stops,
- $q_{e_i e_j}$ is the passenger trip demand for the (e_i, e_j) origin-destination pair,

- $x_{e_i e_j}^{r_j}$ indicate whether a route r_j is a good option for travelling from the station e_i to the station e_j . Its value is 1 if the route is attractive and 0 otherwise.

The *bus fleet size* constraint prevents the set of routes from operating with more buses than are available in the system. This assures that the system is working with the available resources:

$$\frac{T}{N^{r_j}} \leq \frac{1}{f_{r_j}}, \quad \forall r_j \in R,$$

where T is the BRT system operating hours and N^{r_j} is the number of vehicles that can operate along the route r_j .

The *choice of best route* constraint helps to model passenger behavior when choosing a route to travel to their destination. It models the possibility of passengers often being able to take more than one route to reach their destination in the same time.

$$x_{e_i e_j}^{r_k} = 1$$

$$\Downarrow$$

$$\mu_S + \mu_B \times \frac{\sum_{r_m \neq r_k} t_{e_i e_j}^{r_m} \times f_{r_m} \times x_{e_i e_j}^{r_m}}{\sum_{r_m \neq r_k} f_{r_m} \times x_{e_i e_j}^{r_m}},$$

$$\mu_B \times t_{e_i e_j}^{r_k} \leq \frac{\mu_S + \mu_B \times \sum_{r_m \neq r_k} t_{e_i e_j}^{r_m} \times f_{r_m} \times x_{e_i e_j}^{r_m}}{\sum_{r_m \neq r_k} f_{r_m} \times x_{e_i e_j}^{r_m}},$$

$\forall r_k \in R, \forall e_i, e_j \in E$.

The *station vehicle capacity* constraint is very important especially in systems that have great passenger demands and are nearing maximum capacity level. The importance of this constraint is that the vehicle station capacity is the bottleneck of the BRT systems ([9], [1]), like TransMilenio.

$$k_{e_i}^s \geq \sum_{r_j \in R} v_{e_i}^{r_j} \times f_{r_j}, \quad \forall e_i \in E,$$

where $k_{e_i}^s$ is the vehicle capacity of station e_i , and $v_{e_i}^{r_j}$ are binary variables that point out whether station e_i is visited on the route r_j .

VI. CONCLUSIONS AND FUTURE RESEARCH

TransMilenio is Bogotá's most important mass transportation system and one of the biggest BRT systems in the world. There are very few proposals in the literature that focus on optimizing BRT system operation, mainly because BRT systems are relatively a recent form of transport and many of the currently operating BRT systems are nowhere near full capacity.

Most of proposals, and specifically for TransMilenio, are based on bus scheduling and focus on varying the times between each bus departure (i.e., the frequencies) of the different bus routes to minimize costs.

In these proposals, the set of routes are part of the available information, along with the stations at which the buses stop, and they remain constant during the execution of the model.

In the mathematical modeling introduced in this paper we also analyze the frequencies of the routes to minimize costs.

Note that an automated design of routes that minimize the cost function is an open research line. Rather than designing new routes, the aim would be to optimize existing routes by

modifying at most 30% of the stations on the original route. This 30% was fixed by TransMilenio experts at meetings. The reasons for just modifying rather than redesigning routes is that the social impact of modifying the routes is not too high, whereas, the search space is greatly reduced and, therefore, better solutions can be found in less time. An important drawback is that it may not be possible to find a global optimum, because the best routes may have less than 70% of the stations in common with the original routes. In this case it is more important to reduce the social impact on passengers that comes with the modification of the routes.

We are now working with TransMilenio experts on extending and solving the proposed optimization problem. We have selected evolutionary algorithms to solve the problem since they have previously proven to be efficient tools. Additionally, the research team is experience in solving other complex optimization problems using this metaheuristic.

The model we propose is a single objective optimization model since only costs are minimized. However, other objectives could be simultaneously considered, leading to a multi-objective optimization model. Evolutionary algorithms would be then used to identify Pareto optimal solutions, and the expert's preferences could be incorporated into the search process to reach a compromise (satisficing) solution.

Another future research line that we propose is the possibility of adding transfer times to the model. Transfer time is the time it takes to a passenger to switch from one route to another, usually because the first bus that a passenger takes does not stop at the station for which he or she is heading. These times are normally penalized because transfers are an inconvenience for passengers.

Finally, another open research line, and a key aspect for correctly modeling BRT systems is user's behavior. It is important to correctly model which routes users given an origin/destination pair will choose. They are likely to choose the fastest route, but this is not always the case, because users may not know which the fastest route is or because the frequency of the fastest route is low and they opt for an alternative route. This is one of the least explored issues in the BRT systems literature.

ACKNOWLEDGEMENT

The paper was supported by Madrid Regional Government project S-2009/ESP-1685 and the Spanish Ministry of Science and Innovation project MYTM2011-28983-C03-03. The authors would also like to acknowledge the Ministry of Information and Communication Technologies of Colombia and its Talento Digital scholarship program for funding the studies of Francisco J. Peña, and Alirio García for the useful information he provided about TransMilenio system.

REFERENCES

- [1] L. Wright and W. Hook, *Bus rapid transit planning guide*. Institute for Transportation & Development Policy New York, 2007.
- [2] C. Leiva, J. C. Muñoz, R. Giesen, and H. Larrain, "Design of limited-stop services for an urban bus corridor with capacity constraints," *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 44, no. 10, pp. 1186–1201, 2010. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S019126151000044>
- [3] Observatorio de Movilidad, "Comportamiento de los indicadores de movilidad de la ciudad a diciembre de 2010," Observatorio de Movilidad, Tech. Rep. 6, 9 2011.
- [4] (2013, 2) Panorama of brt and bus corridors in the world. BRTdata.org. [Online]. Available: <http://brtdata.org/>
- [5] H. Levinson, S. Zimmerman, J. Clinger, S. Rutherford, R. L. Smith, J. Cracknell, and R. Soberman, "Bus rapid transit, volume 1: Case studies in bus rapid transit," Transportation Research Board, Tech. Rep., 2003.
- [6] D. Hinebaugh, "Characteristics of bus rapid transit for decision-making," Tech. Rep., 2009.
- [7] I. Chaparro, *Evaluación del impacto socioeconómico del transporte urbano en la ciudad de Bogotá: el caso del sistema de transporte masivo, TransMilenio*, ser. Serie Recursos Naturales e Infraestructura. United Nations Publications, 2002. [Online]. Available: <http://www.eclac.org/publicaciones/xml/3/11423/LCL1786-P-E.pdf>
- [8] S. L. Ángel, C. García, O. Santiago, J. Concha, and M. R. Caldas, "Plan Marco 2010 Sistema TransMilenio," Dirección de Planeación de Transporte, Tech. Rep., 2010.
- [9] A. Cain, G. Darido, M. R. Baltes, P. Rodriguez, and J. C. Barrios, "Applicability of Bogotá's TransMilenio BRT System to the United States," National Bus Rapid Transit Institute (NBRTI); Center for Urban Transportation Research (CUTR); University of South Florida, Tech. Rep., 2006.
- [10] Steer Davies Gleave, "Estudio de determinación de la capacidad del sistema TransMilenio. Estudio realizado para TransMilenio SA, Bogotá," Steer Davies Gleave, Tech. Rep., 2007.
- [11] Kittelson & Associates and United States. Federal Transit Administration and Transit Cooperative Research Program and Transit Development Corporation, *Transit Capacity and Quality of Service Manual*. Transportation Research Board National Research, 2003, vol. 100.
- [12] A. F. G. Valderrama, S. H. Pérez, M. C. Benítez, J. C. Grisales, M. A. Hinojosa, D. E. Duenas, J. C. T. Gomez, L. A. Guzmán, N. C. Acosta, M. V. Roper, and P. J. G. H. Edna Rodríguez Aleman, *Manual De Planeación Y Diseño Para La Administración Del Tránsito Y Transporte*, E. C. de Ingeniería, Ed. Alcaldía Mayor de Bogotá, 2005.
- [13] C. Sun, W. Zhou, and Y. Wang, "Scheduling combination and headway optimization of bus rapid transit," *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, vol. 8, no. 5, pp. 61–67, 2008.
- [14] X. Chen, B. Hellinga, C. Chang, and L. Fu, "Optimization of headways for bus rapid transit system with stop-skipping control," in *Transportation Research Board 91st Annual Meeting*, no. 12-1999, 2012.
- [15] H. Larrain, R. Giesen, and J. C. Muñoz, "Choosing the right express services for bus corridor with capacity restrictions," *Transportation Research Record*, no. 2197, pp. 63–70, 2010.
- [16] H. Larrain, R. Giesen, and J. C. Muñoz, "The effect of od trip dispersion versus concentration in express service design," in *12th World Conference on Transport Research. Lisbon, Portugal, 11-15 July 2010, 7 2010*. [Online]. Available: <http://intranet.imet.gr/Portals/0/UsefulDocuments/documents/03406.pdf>
- [17] W. Ma and X. Yang, "A passive transit signal priority approach for bus rapid transit system," in *Intelligent Transportation Systems Conference, 2007. ITSC 2007. IEEE*, 2007, pp. 413–418.
- [18] K. Wang and F. Zhu, "A real-time brt signal priority approach through two-stage green extension," in *9th IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC), 2012, 2012*, pp. 7–11.
- [19] L. Yong, Y. Yun, and G. Hongli, "The design of the brt signal priority control at the intersection," in *International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA), 2008, vol. 1, 2008*, pp. 507–511.
- [20] S. Cao, L. Zhang, and F. Zhao, "An rfid signal capturing and controlling system for brt priority system," in *Proceedings of the 2009 First IEEE International Conference on Information Science and Engineering*, ser. ICISE '09. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2009, pp. 4725–4729. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1109/ICISE.2009.293>
- [21] H. Xu, J. Sun, and M. Zheng, "Comparative analysis of unconditional and conditional priority for use at isolated signalized intersections,"

Journal of Transportation Engineering, vol. 136, no. 12, pp. 1092–1103, 2010.

- [22] D. Lopez, A. Triana, and H. Chamorro, “Simulation model of public transportation system using multiagent approach by means of petri nets: Bogotá study case,” in *Robotics Symposium, 2011 IEEE IX Latin American and IEEE Colombian Conference on Automatic Control and Industry Applications (LARC)*. IEEE, 2011, pp. 1–6.
- [23] S. Duarte, D. Becerra, and L. Niño, “Un modelo de asignación de recursos a rutas en el sistema de transporte masivo TransMilenio,” *Avances en Sistemas e Informática*, vol. 5, no. 1, pp. 163–172, 2008. [Online]. Available: <http://www.revista.unal.edu.co/index.php/avances/article/download/9984/10516>
- [24] M. A. Valbuena and D. Hidalgo, “Propuesta metodológica para la evaluación de rutas del sistema TransMilenio,” 2005.

BIBLIOGRAFÍA

-
- Ángel, S. L., García, C., Santiago, O., Concha, J. & Caldas, M. R. (2010). *Plan Marco 2010 Sistema TransMilenio*. Dirección de Planeación de Transporte. Recuperado desde https://www.transmilenio.gov.co/portal_transmilenio/AdmContenidoUpload/javier.hernandez/Documents/SITP/CuartoDatos/Plan%20Marco%20Sistema%20Transmilenio.pdf
- Ardila-Gómez, A. (2004, septiembre). *Transit planning in curitiba and bogotá. roles in interaction, risk, and change*. (Tesis doctoral, Massachusetts Institute of Technology). Recuperado desde <http://dspace.mit.edu/handle/1721.1/28791>
- Cain, A., Darido, G., Baltes, M. R., Rodríguez, P. & Barrios, J. C. (2006). *Applicability of Bogotá's TransMilenio BRT System to the United States*. National Bus Rapid Transit Institute (NBRTI); Center for Urban Transportation Research (CUTR); University of South Florida. Recuperado desde http://www.fta.dot.gov/documents/Bogota_Report_Final_Report_May_2006.pdf
- Cao, S., Zhang, L. & Zhao, F. (2009). An rfid signal capturing and controlling system for brt priority system. En *Proceedings of the 2009 first ieee international conference on information science and engineering* (pp. 4725-4729). ICISE '09. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society. doi:10.1109/ICISE.2009.293
- Chaparro, I. (2002). *Evaluación del impacto socioeconómico del transporte urbano en la ciudad de bogotá: el caso del sistema de transporte masivo, transmilenio*. Serie Recursos Naturales e Infraestructura. United Nations Publications. Recuperado desde <http://www.eclac.org/publicaciones/xml/3/11423/LCL1786-P-E.pdf>
- Chen, X., Hellinga, B., Chang, C. & Fu, L. (2012). Optimization of headways for bus rapid transit system with stop-skipping control. En *Transportation research board 91st annual meeting* (12-1999).

- Concha, J. (2010, diciembre). *Diseño servicios fase iii, soacha y extensión autonorte*. TransMilenio.
- Concha, J. (2011, mayo). El aumento de la demanda: el reto de los sistemas brt. En *Conferencia de transporte sustentable, calidad del aire y cambio climático para américa latina y el caribe*. TransMilenio. Clear Air Institute. Recuperado desde TransMilenio: http://cleanairinstitute.org/download/rosario/gp3_2_02_juanita_concha.pdf
- DANE. (2010). *Proyecciones nacionales y departamentales de población. 2005-2020* (inf. téc. N.º 7). DANE. Recuperado desde http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/poblacion/proyepobla06_20/7Proyecciones_poblacion.pdf
- Dong, X., Xiong, G., Fan, D., Zhu, F. & Lv, Y. (2011). Research on bus rapid transit (brt) and its real-time scheduling. En *Service operations, logistics, and informatics (soli), 2011 ieee international conference on* (pp. 342-346). doi:10.1109/SOLI.2011.5986582
- Duarte, S., Becerra, D. & Niño, L. (2008). Un modelo de asignación de recursos a rutas en el sistema de transporte masivo TransMilenio. *Avances en Sistemas e Informática*, 5(1), 163-172. Recuperado desde <http://www.revista.unal.edu.co/index.php/avances/article/download/9984/10516>
- El Tiempo. (2012, julio). Atentos, desde hoy baja la tarifa de transmilenio. Recuperado desde El Tiempo: http://www.eltiempo.com/colombia/bogota/ARTICULO-WEB-NEW_NOTA_INTERIOR-12084312.html
- Guzmán, A. F., Henao, S., Carvajal, M., Cárdenas, J., Hinojosa, M. A., Duenas, D. E., ... Gómez, P. J. (2005). *Manual de planeación y diseño para la administración del tránsito y transporte* (E. C. de Ingeniería, Ed.). Alcaldía Mayor de Bogotá.
- Hinebaugh, D. (2009). *Characteristics of bus rapid transit for decision-making*. Recuperado desde http://www.fta.dot.gov/documents/CBRT_2009_Update.pdf
- Kittelson & Associates and United States. Federal Transit Administration and Transit Cooperative Research Program and Transit Development Corporation. (2003). *Transit capacity and quality of service manual*. Transportation Research Board National Research.
- Larrain, H., Giesen, R. & Muñoz, J. (2010a). Choosing the right express services for bus corridor with capacity restrictions. *Transportation Research Record*, (2197), 63-70. doi:10.3141/2197-08
- Larrain, H., Giesen, R. & Muñoz, J. (2010b, julio). The effect of od trip dispersion versus concentration in express service design. En *12th world conference on transport research. lisbon, portugal, 11-15 july 2010*. Recuperado desde <http://intranet.imet.gr/Portals/0/UsefulDocuments/documents/03406.pdf>
- Leiva, C., Muñoz, J., Giesen, R. & Larrain, H. (2010). Design of limited-stop services for an urban bus corridor with capacity constraints. *Transportation Research Part B: Methodological*, 44(10), 1186-1201. doi:10.1016/j.trb.2010.01.003
- Levinson, H., Zimmerman, S., Clinger, J., Rutherford, S., Smith, R. L., Cracknell, J. & Soberman, R. (2003). *Bus rapid transit, volume 1: case studies in bus*

- rapid transit*. Transportation Research Board. Recuperado desde http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/tcrp/tcrp_rpt_90v1.pdf
- Lillo, E., Willumsen, L. & Wensell, U. (2003). Innovación en el transporte urbano: bus transit systems. *Economía industrial*, (353), 65-72. Recuperado desde <http://www.minetur.gob.es/Publicaciones/Publicacionesperiodicas/EconomiaIndustrial/RevistaEconomiaIndustrial/353/065lillo.pdf>
- López, D., Triana, A. & Chamorro, H. (2011). Simulation model of public transportation system using multiagent approach by means of petri nets: bogotá study case. En *Robotics symposium, 2011 ieee ix latin american and ieee colombian conference on automatic control and industry applications (larc)* (pp. 1-6). IEEE.
- Ma, W. & Yang, X. (2007). A passive transit signal priority approach for bus rapid transit system. En *Intelligent transportation systems conference, 2007. itsc 2007. ieee* (pp. 413-418). doi:10.1109/ITSC.2007.4357625
- Noticias Uno. (2012, junio). Transmilenio inició oficialmente operación en la calle 26. Recuperado desde Noticias Uno: <http://noticiasunolaredindependiente.com/2012/06/30/noticias/transmilenio-fase-3/>
- Observatorio de Movilidad. (2010, agosto). *Comportamiento de los indicadores de movilidad de la ciudad a diciembre de 2009* (inf. téc. N.º 5). Observatorio de Movilidad. Recuperado desde http://institutodeestudiosurbanos.info/dmdocuments/cendocieu/coleccion_digital/Transmilenio/Observatorio_Movilidad_No_5-Camara_Comercio-2010.pdf
- Observatorio de Movilidad. (2011, septiembre). *Comportamiento de los indicadores de movilidad de la ciudad a diciembre de 2010* (inf. téc. N.º 6). Observatorio de Movilidad. Recuperado desde http://camara.ccb.org.co/documentos/11498_observatorio6mov.pdf
- Páez, F. (2011). Sistema integrado de transporte público. Recuperado desde http://www.itdp.org/documents/ITDP_Summit_Fernando_Paez_-_Sistema_Integrado_de_Transporte_Publico.pdf
- Panorama of BRT and bus corridors in the world. (2013, febrero). Recuperado desde BRTdata.org: <http://brtdata.org/>
- Steer Davies Gleave. (2012, agosto). *Consultoría para evaluar el crecimiento de la demanda del sistema troncal dentro del sitp y priorizar soluciones de corto y mediano plazo que permitan ampliar la capacidad del sistema*. Steer Davies Gleave.
- Steer Davies Gleave. (2007). *Estudio de determinación de la capacidad del sistema TransMilenio. Estudio realizado para TransMilenio SA, Bogotá*. Steer Davies Gleave.
- Sun, C., Zhou, W. & Wang, Y. (2008). Scheduling combination and headway optimization of bus rapid transit. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 8(5), 61-67. doi:10.1016/S1570-6672(08)60039-2

- TransMilenio. (2013a, febrero). *Informe de gestión 2012*. TransMilenio. Recuperado desde <http://www.transmilenio.gov.co/transmiftp/pages/informedegestion2012.pdf>
- TransMilenio. (2013b, febrero). Página web de transmilenio. Recuperado desde TransMilenio: <http://www.transmilenio.gov.co>
- TransMilenio. (2013c, febrero). Recuperado desde Wikipedia: <http://en.wikipedia.org/wiki/TransMilenio>
- Valbuena, M. A. & Hidalgo, D. (2005). Propuesta metodológica para la evaluación de rutas del sistema TransMilenio. Recuperado desde http://dspace.uniandes.edu.co/xmlui/bitstream/handle/1992/112/mi_1016.PDF?sequence=1
- Wang, K. & Zhu, F. (2012). A real-time brt signal priority approach through two-stage green extension. En *9th ieee international conference on networking, sensing and control (icnsc), 2012* (pp. 7-11). doi:10.1109/ICNSC.2012.6204882
- World City Information - Bogotá. (2013, febrero). Recuperado desde city-infos.com: <http://www.city-infos.com/bogota/>
- Wright, L. & Hook, W. (2007). *Bus rapid transit planning guide*. Institute for Transportation & Development Policy New York. Recuperado desde <http://www.nbrti.org/docs/pdf/ITDP%20BRT%20Planning%20Guide.pdf>
- Xu, H., Sun, J. & Zheng, M. (2010). Comparative analysis of unconditional and conditional priority for use at isolated signalized intersections. *Journal of Transportation Engineering*, 136(12), 1092-1103. doi:10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000179. eprint: <http://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/%28ASCE%29TE.1943-5436.0000179>
- Yong, L., Yun, Y. & Hongli, G. (2008). The design of the brt signal priority control at the intersection. En *International conference on intelligent computation technology and automation (icicta), 2008* (Vol. 1, pp. 507-511). doi:10.1109/ICICTA.2008.347