
INNOVACIÓN EN EL TRANSPORTE URBANO: *BUS TRANSIT SYSTEMS*

.....
ENRIQUE LILLO
ULISES WENSELL
LUIS WILLUMSEN
Steer Davies Gleave

LOS VIAJEROS VALORAN LA CALIDAD DEL TRANSPORTE PÚBLICO QUE SE LES OFRECE. A IGUALDAD DE CONDICIONES, LAS PERSONAS PREFIEREN VIAJAR EN METRO O TRANVÍA QUE DESPLAZARSE EN AUTOBÚS. LAS RAZONES PARA ESTA

65

preferencia están en la marcha uniforme y suave, aceleración y frenado sin sorpresas, interiores modernos y luminosos y la apariencia externa de los vehículos. Esta preferencia por los tranvías modernos ha motivado la popularidad de este modo de transporte en Europa. Incluso países como el Reino Unido, que prácticamente abandonó los tranvías en el pasado, ha vuelto a incorporarlos en Manchester, Sheffield, Londres y los Midlands.

Los viajeros valoran los tranvías y metros modernos más que el autobús, pero desgraciadamente sus costes de inversión son

mucho más altos. Por ello es relevante preguntarse ¿cuánto más valioso para el usuario es un sistema férreo que un autobús normal? En algunos casos, esta valoración puede justificar una mayor inversión, por ejemplo para atraer usuarios del automóvil particular; en otros, puede no ser así.

Esta pregunta ha sido investigada a fondo en varios países utilizando técnicas de Preferencias Reveladas y Declaradas. En nuestra experiencia profesional, en el contexto cultural de las Islas Británicas y confirmado en la península Ibérica, un sistema férreo (estrictamente sobre un sopor-

te fijo de cualquier tipo) tiene una ventaja de 2 a 15 minutos generalizados (1) sobre los autobuses convencionales. Los valores inferiores de este rango son típicos de los usuarios sin acceso al automóvil mientras que los más altos corresponden a usuarios del automóvil de renta alta.

Los tranvías modernos y metros tienen también una capacidad y rendimiento superiores a un autobús convencional. Esto se debe al poco tiempo necesario para subir y bajar pasajeros en las estaciones. Si bien un bus articulado moderno tiene tanta capacidad como un tranvía de simi-

lares dimensiones, el tranvía y el metro tienen menores demoras en las estaciones por pasajero transportado. Esto es importante porque los altos costes de inversión y operación de los metros y tranvías modernos deben sustentarse en un gran número de beneficiarios para que se justifiquen económicamente.

Muchas ciudades han decidido que tienen suficiente demanda para justificar los niveles de inversión requeridos por un metro o LRT. Sin embargo, estos altos niveles de demanda no siempre van acompañados de la disponibilidad a pagar las tarifas que se requerirían para recuperar la inversión y los costos de operación. Por ello, ni siquiera los tranvías modernos se financian totalmente con inversión privada y a menudo requieren apoyo financiero importante del sector público.

Ni aún en Gran Bretaña, donde los usuarios están acostumbrados a tarifas más altas que en la Europa Continental, ha sido posible introducir tranvías modernos sin una contribución importante del sector público, a menudo justificada por las externalidades positivas de tales sistemas: reducción de la congestión, menores emisiones y accidentes y reactivación económica.

SISTEMAS DE TRANSPORTE MASIVO CON BUSES TMB

66

Existen varias soluciones intermedias que con un adecuado diseño y niveles de inversión razonables ofrecen un sistema de transporte masivo moderno y atractivo, basado en buses y a bajo coste. Por ejemplo, hay varios sistemas basados en buses guiados, como el O-Bahn en Adelaida (Australia) y el Leeds Quality Bus (UK). Steer Davies Gleave ha planeado y diseñado otros corredores como :

- Cambridge SuperCAM, donde hemos trabajado con el sector privado para ofrecer un sistema de Bus Rapid Transit que conecta Cambridge con Huntingdon.

- Luton a Dunstable Translink, donde hemos diseñado un corredor con buses guiados para ofrecer un servicio de alta calidad.

CUADRO 1
COMPARACIÓN DE DIFERENTES TECNOLOGÍAS DE TRANSPORTE MASIVO

Característica	Tranvía-LRT	Metro	TMB-BRT
Capacidad (Pasajeros/ vehículo)	110-250	140-280	80-160
Vehículos/unidad	1-4	1-10	1
Velocidad máxima (km/h)	60-80	70-100	60-70
Velocidad comercial (km/h)	15-35	25-55	15-30
Frecuencia máxima (unidades/h)	40	20-40	70-210
Capacidad (pasajeros/h/sentido)	6.000-20.000	10.000-72.000	11.000-40.000
Costos de inversión (Millones €/km)	15-50	30-200	1-10

FUENTE: Datos y valoración de Steer Davies Gleave.

- Glasgow Harbour, donde seleccionamos un «tranvía sobre neumáticos» como una solución innovadora y atractiva.

- Probablemente, el más exitoso de los sistemas diseñados por la empresa es Transmilenio en Bogotá, Colombia. Este cubre siete corredores con capacidades y rendimiento similares a un metro, de los que tres funcionan ya en la actualidad. (www.transmilenio.gov.co).

Estos casos muestran como puede diseñarse un sistema de transporte público masivo de calidad y bajo coste, basándolo en la tecnología de buses pero incorporando otros elementos avanzados para merecer el nombre de Bus Rapid Transit (BRT). La gran ventaja de estos sistemas reside, sin embargo, en sus reducidos costos de inversión, a veces un orden de magnitud menor que un sistema férreo. Como los buses son sencillos de operar y mantener, los costos de operación de los sistemas BRT son también menores. El cuadro 1 compara algunas características claves de los tranvías modernos (LRT), metro y Transporte Masivo por Bus TMB (BRT).

Los altos valores para capacidad y velocidad comercial de TMB requieren un comentario. Estos no son valores estimados sino **observados** en secciones de Transmilenio. Estas mejoras en el diseño de sistemas de transporte masivo basados en autobuses han sido posibles por dos razones fundamentales:

- Un entendimiento más cabal de cómo se puede aumentar la capacidad y velocidad comercial de un alto número de buses en un corredor y la disponibilidad de herramientas de análisis para ello.

- El desarrollo de tecnologías de bajo coste para el seguimiento y control de autobuses y sistemas de venta y cancelación de billetes.

Aún más, un sistema TMB bien diseñado e implementado puede ser casi tan valorado por los usuarios como un tranvía o un metro. Por ejemplo, le asignan al TMB una ventaja modal de alrededor de 7-10 minutos comparados con servicios de buses convencionales. En la práctica, algunos sistemas como Transmilenio se perciben tan atractivos como un tranvía por los mayores niveles de inversión y la confiabilidad de sus servicios. Transmilenio incluso ha logrado atraer un número importante de usuarios del automóvil, posiblemente la mayor confirmación de su valor en materia de servicios de transporte público.

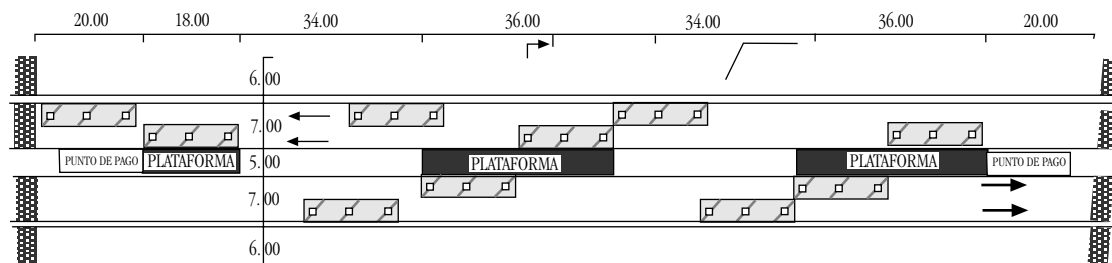
EJEMPLOS DE SISTEMAS TMB

Es útil considerar algunos ejemplos de sistemas de transporte masivo basados en autobuses y comentar sobre su contribución al «estado del arte». Nuestra elección es internacional y toma ejemplos de Europa, América Latina y Australia.

SAO PAULO Y PORTO ALEGRE

Hace más de 20 años que primero Sao Paulo y luego Porto Alegre (entre otras) comenzaron a experimentar con formas de aumentar la capacidad y velocidad de los servicios de buses. Ambas ciudades construyeron carriles exclusivos para buses, segregados físicamente del resto del tráfico y a menudo en la parte central de

FIGURA 1
DISEÑO DE PARADAS MÚLTIPLES, CENTRALES CON PLATAFORMA LARGA



FUENTE: Elaboración propia.

una avenida o corredor. La segregación física eliminó la congestión creada por otros vehículos pero evidenció que cuando hay más de 100 buses por hora la interferencia entre ellos es una importante causa de demoras en las paradas. Para reducir este problema se adoptaron dos tipos de soluciones alternativas: formar convoyes y permitir el adelantamiento en paradas.

La solución más innovadora fue operar cuatro o seis buses como un convoy de manera que se detuvieran y partieran en cada parada al mismo tiempo. De esta forma se reduce la interferencia y el sistema opera casi como un metro con cuatro o seis «unidades» en cada caso y se obtienen velocidades comerciales similares. Los convoyes se forman agrupando servicios que sirven localidades comunes y esta operación requiere que algunos servicios esperen la llegada del resto; estas esperas se compensan con menores demoras en las paradas. A pesar de diseñar diversas técnicas para formar y mantener convoyes, en la práctica estos tienden a desintegrarse parcialmente con lo que se reduce su ventaja. Así, un convoy de cuatro autobuses tiene sólo el doble de la capacidad de un autobús sencillo.

La segunda solución tiene un valor más general. Al permitir el adelantamiento dentro del área segregada del carril exclusivo se reduce la interferencia en las paradas. Se pueden diseñar paradas diferenciadas para cada servicio y, lo que contribuye más al rendimiento del sistema, se puede operar con servicios expresos que no paran en todas las paradas y convencionales que sí lo hacen. El diseño de una parada con varios sitios y continuidad de plataforma permite un

trasbordo rápido entre servicios expresos y convencionales logrando así un mejor rendimiento y flexibilidad. La figura 1 muestra un diseño de este tipo para Transmilenio; nótese que los buses troncales de Transmilenio operan con las puertas al lado izquierdo.

O-BAHN EN ESSEN Y ADELAIDA

O-Bahn introduce la idea de guiar los buses utilizando pequeñas ruedas laterales. Esto permite el diseño de carriles más estrechos y mejora la comodidad de marcha (reducción de las aceleraciones laterales y verticales). Los costes adicionales de infraestructura son bajos y en los vehículos también. Los buses no pueden contar con este tipo de guía en las intersecciones a nivel y deben estar guiados por el conductor en esa instancia.

Por ello, un sistema como este ofrece ventajas en la medida que buena parte del trayecto pueda estar segregada físicamente. Un sistema guiado no permite fácilmente el adelantamiento y opera bien para valores menores de demanda. Se han desarrollado otras formas de guiar autobuses sin carriles laterales pero requieren de tecnología más avanzada y cara y no resuelven el problema de adelantamiento.

CURITIBA Y EL DISEÑO DE PARADAS-ESTACIONES

Es injusto destacar Curitiba sólo por esta contribución. La verdad es que esta ciudad brasileña ha sido una inspiración para varios sistemas de transporte masivo basados en autobuses, incluyendo

Quito y Bogotá. Curitiba ha sido un ejemplo de la importancia de planificar el crecimiento de una ciudad en torno a corredores de transporte masivo y cómo adaptar éstos cuando la demanda aumenta, algo que es mucho más fácil con autobuses, que pueden operar fuera de sus carriles segregados, que con un sistema férreo.

Curitiba adoptó la idea de operar servicios alimentadores y troncales e introdujo la idea de diseñar paradas como mini-estaciones, con plataforma alta y cancelando los billetes el entrar a la estación de modo que se utilizan todas las puertas del bus, permitiendo que los viajeros suban y bajen rápidamente. La plataforma alta en las estaciones no es indispensable; sin embargo, ofrece ventajas de costo en los vehículos y reduce las oportunidades para abordar los buses sin pagar.

LA TECNOLOGÍA DE TMB

Un sistema TMB de alto rendimiento cuenta con características que le permiten ofrecer las siguientes prestaciones:

Una alta velocidad comercial (velocidad media en una sección incluyendo demoras en paradas, intersecciones, etc.) para reducir el tiempo en el vehículo. Las principales causas de las demoras a bordo son: la congestión (interferencia) causada por otros vehículos (autos y buses), el número de paradas en la ruta, las demoras en cada parada para tomar y dejar pasajeros, y las demoras en intersecciones a nivel. Veremos más adelante cómo puede abordarse cada una de estas fuentes de demoras.

Frecuencias altas para reducir tiempos de espera. Para lograr estas es necesario diseñar los servicios y las redes cuidadosamente. La agrupación de servicios en corredores puede servir para aumentar la frecuencia y la disponibilidad de información en tiempo real al pasajero reduce la percepción de las demoras.

Buena penetración en áreas de alta demanda para reducir tiempos de acceso. Esto requiere un buen diseño de rutas y de los aspectos operacionales de las mismas, por ejemplo un sistema de servicios troncales con vehículos de gran capacidad y alimentadores con buses más pequeños.

Buen diseño de la infraestructura para hacer el servicio más seguro y atractivo; la calidad de los vehículos contribuye a mejorar también estos aspectos.

Para lograr estos objetivos, es necesario diseñar todo el sistema de transporte masivo basado en autobuses en forma consistente y coherente. Es necesario abordar tres elementos indispensables de este diseño: Infraestructura y tecnología, Aspectos operacionales, y Planificación y facilidad de uso. Discutiremos cada uno de estos aspectos utilizando a Transmilenio como un ejemplo ilustrativo.

INFRAESTRUCTURA Y TECNOLOGÍA

La infraestructura y tecnología de transporte masivo con buses TMB incluye los siguientes aspectos tecnológicos:

Los carriles de circulación. Pueden ser un simple carril exclusivo con alguna segregación física o un sistema de bus guiado por carriles laterales como en el caso de O-Bahn de Adelaide y Essen. En los sistemas de alta capacidad puede ser necesario contar con carriles exclusivos dobles para permitir el adelantamiento de buses. Como la restricción de capacidad de un sistema de este tipo se encuentra en las estaciones/paradas, a menudo se diseñan con carriles dobles en ellas para permitir adelantar.

Intersecciones. Las intersecciones a diferentes niveles reducen demoras pero son mucho más caras. Cuando no se justifican,



es posible emplear sistemas de prioridad en los semáforos que detecten los autobuses y adapten el verde para su paso.

Paradas y estaciones. Todos los sistemas TMB requieren paradas similares a las de un tranvía o LRT de superficie. La inversión mínima es un simple refugio de la intemperie como en el caso del Leeds Quality Bus, o una estación protegida como en el caso de Curitiba y Transmilenio donde los pasajeros cancelan su pasaje al entrar a la misma y abordan los autobuses por todas las puertas simultáneamente. Las estaciones pueden tener la plataforma en el centro, lo que facilita los transbordos. Sin embargo, esto requiere buses con las puertas a la izquierda lo que aumenta ligeramente el coste.

Acceso peatonal a las estaciones. Son necesarios aún cuando las estaciones estén en las aceras, ya que los volúmenes de pasajeros pueden ser importantes. El mínimo es un paso de cebrá o un semáforo peatonal; en el otro extremo se puede diseñar el acceso por puentes o túneles que crucen la calzada dando mayor seguridad y menos demoras al tráfico.

Vehículos. Para proporcionar capacidad (y calidad e imagen) suficiente a menudo se utilizan buses articulados (por ejemplo, bi-articulados en Curitiba y con simple articulación en Bogotá y Quito). Si se cancela el billete en la estación, es deseable que las plataformas del bus y la

estación sean altas para reducir la oportunidad de fraude. En Transmilenio las estaciones son centrales y el conductor y las puertas de los buses están a la izquierda para facilitar la aproximación del bus.

Control de los servicios y sistema de información al usuario. El seguimiento de la localización de cada autobús en tiempo real es útil cuando las condiciones de la ruta reducen la regularidad del servicio. En la actualidad el coste de los sistemas de localización (GPS o balizas) es bajo, y se puede complementar con mensajes al usuario en las estaciones. Estos elementos son particularmente importantes si las frecuencias son relativamente bajas.

Tecnología de billeteaje. Como buena parte de las demoras ocurre en estaciones y paradas, la tecnología de los medios de pago puede reducir esperas y facilitar la integración entre diferentes servicios. Para obtener buenos rendimientos es necesario imponer la cancelación del pasaje antes de abordar el bus. El uso de tarjetas inteligentes puede ayudar a satisfacer estos requerimientos.

DISEÑO OPERACIONAL DEL SISTEMA

Los elementos fundamentales del diseño operacional son la definición de rutas, el patrón de servicios, sus frecuencias, la distancia entre estaciones/paradas y la integración con otros servicios y modos.

La **definición de rutas** define la cobertura del sistema propuesto, qué vías utilizarán y cómo se complementarán diferentes rutas. Una decisión importante es la de organizar las rutas como servicios troncales y alimentadores o tratar de servir muchos pares Origen Destino directamente sin transbordo. La estructura de servicios troncales y alimentadores es típica de sistemas de metro y LRT y por lo tanto parece natural adoptarla para sistemas de transporte masivo basados en autobuses. Sin embargo, tal sistema sólo será atractivo si ofrece un mejor servicio que una red de rutas directas.

Patrón de servicios. Los sistemas de alto rendimiento basados en buses pueden operar con una combinación de servicios

expresos y convencionales reduciendo así los conflictos en paradas y mejorando la velocidad comercial promedio. Como vimos anteriormente, se pueden organizar también convoyes para operar los servicios, sin embargo, sus ventajas se pierden si no se mantienen compactos, lo que es muy difícil en la práctica.

Frecuencia de los servicios. Para los usuarios los tiempos de espera, acceso y transferencia son más onerosos que los tiempos en el vehículo. Para ofrecer un mejor servicio debemos tratar de reducir estos tiempos ofreciendo una buena cobertura, alta frecuencia y fácil transferencia entre servicios. Transmilenio logra esto utilizando buses alimentadores más pequeños, estaciones de intercambio especialmente diseñadas para facilitar transferencias y una combinación de servicios de buses articulados expresos y convencionales.

Distancia entre paradas. Cada parada significa demoras para cada uno de los pasajeros a bordo. Reducir el número de paradas permite ahorros de tiempo pero tiende a aumentar los tiempos de acceso al sistema. Por ello, las paradas en un sistema TMB están a unos 400 metros distancia unas de otras. La mejor separación entre paradas depende de las condiciones locales y de los patrones de demanda

Integración con otros servicios. Un sistema de transporte masivo con buses TMB a menudo tiene elementos de integración entre distintos servicios, por ejemplo troncales y alimentadores. Sin embargo, un TMB rara vez cubre la totalidad de una ciudad y es necesario ofrecer una buena integración con otros servicios de transporte público. Aún más, varios sistemas TMB ofrecen buena integración con servicios de taxi (por ejemplo en Quito) o automóvil particular con aparcamiento en estaciones terminales (Park&Ride). También hay una excelente oportunidad para integrar mejor el transporte por bicicleta con las estaciones de TMB ofreciendo un lugar seguro para dejarla durante el día.

FACILIDAD DE USO Y ASPECTOS DE PLANIFICACIÓN

Hay una serie de elementos que deben tomarse en cuenta para apoyar la percep-



ción de un sistema moderno y atractivo y que puede servir de apoyo a la regeneración económica de partes de la ciudad.

Marketing y arquitectura. A primera vista estos serían dos temas diferentes pero se complementan muy bien. Las personas, usuarios o no, valoran una arquitectura consistente y atractiva en todas las instalaciones de un TMB. El marketing es importante para comunicar la idea de un sistema integrado, vital y moderno. Ambos elementos son necesarios para hacer de un sistema TMB un elemento estructurador del desarrollo y renovación de una ciudad. Escatimar recursos en estas dos áreas es un error que costará años recuperar.

Estrategia de tarifas. No es necesario enfatizar la importancia de un buen sistema integrado de tarifas. La tecnología moderna facilita esta integración mediante el uso de Tarjetas Inteligentes sin-contacto y una variedad de formas de pago. Un sistema inteligente de tarifas incluirá también abonos semanales y mensuales y descuentos especiales para horas de menor demanda.

Sistemas de información al usuario. Estos ya han sido mencionados como uno de los aspectos de la tecnología. Muy importante también es el diseño de buenos elementos de comunicación visual y mapas de alta calidad. Una página web que ayude a encontrar formas de viajar en transporte público entre dos puntos

(ver www.comoviajo.com para Buenos Aires) puede ayudar en este sentido. El uso de SMS, y en breve tiempo servicios dependientes de la localización del teléfono móvil, harán que la información apropiada esté disponible cuando se necesite y a un coste mínimo.

Seguridad. Este es un aspecto cada día más importante para la aceptación de un sistema, cualquiera sea su tecnología. Transmilenio ha sorprendido a muchos reduciendo no sólo el número de accidentes sino también los delitos en el sistema, en una ciudad difícil como Bogotá.

Planificación y reactivación económica. Generalmente se reconoce que para lograr la reactivación económica y social de un área urbana deprimida la construcción de infraestructura de transporte y comunicaciones es esencial. Por ejemplo, el Docklands Light Rail jugó un papel importante y positivo en la regeneración del antiguo puerto de Londres. En sistema de transporte masivo por autobuses o TMB puede jugar un papel similar siempre que cuente con un muy buen diseño, una arquitectura consistente y de alta calidad, buenas estaciones y segregación física. Así lo demostró Curitiba y aún más importante Transmilenio en Bogotá.

Asociación con el sector privado. La participación activa del sector privado en este tipo de proyectos no es indispensable pero en la actualidad se la considera conveniente y necesaria. El sector privado puede contribuir a la eficiencia de las operaciones y a la calidad del servicio. Es muy importante diseñar documentos de contrato de participación que fomenten la calidad con sistemas de bonificaciones y penalizaciones.

•••••
CÓMO SE OBTIENE BUEN RENDIMIENTO DE LOS SISTEMAS TMB

En esta sección se discuten aquellos aspectos que permiten aumentar la capacidad y rendimiento de un sistema de transporte masivo con buses. Este análisis se basa en los conceptos de capacidad (máximo número de pasajeros transporta-

bles por hora y sentido) y de velocidad comercial (distancia recorrida en un tramo dividida por el tiempo de viaje incluyendo todas las demoras en paradas e intersecciones).

La velocidad comercial a lo largo de un corredor servido por TMB depende de las siguientes características fundamentales: Velocidad del bus en movimiento, demoras en intersecciones y cuellos de botella, número de paradas por kilómetro y tiempo en las paradas.

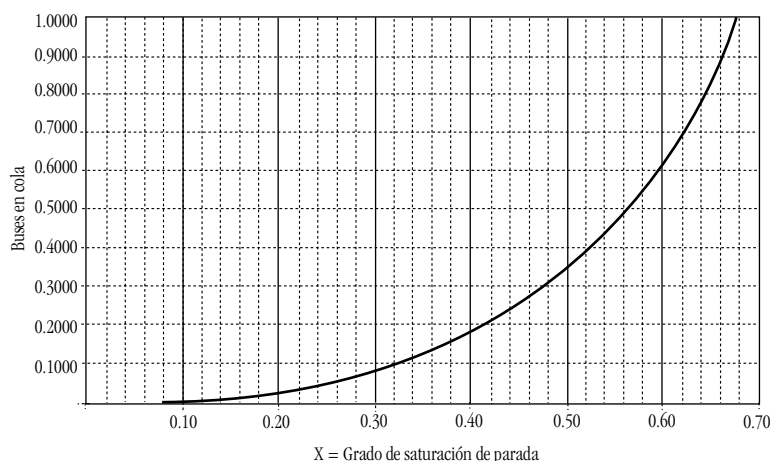
El primero de estos parámetros depende del diseño de los carriles exclusivos, las características de los vehículos y en parte en el número de paradas, que afecta las operaciones de frenado y aceleración. Las demoras en intersecciones dependen de su diseño y de la intensidad del tráfico. El número de paradas es función del diseño operacional de los servicios expresos y/o convencionales, troncales y alimentadores, etc.

Nos concentraremos aquí en las demoras en las paradas simples ya que estas tienen un impacto muy importante en el rendimiento de los sistemas TMB.

La capacidad de una parada simple depende del tiempo de maniobras de llegada y salida y el tiempo para subir y bajar pasajeros. Si las demoras en una parada son, por ejemplo, 30 segundos, la capacidad máxima en este lugar será de 120 buses por hora. Sin embargo, los buses no llegan en forma regular y por tanto se formarán colas a la entrada de la parada, con lo que se aumentan considerablemente las demoras. Para ser consistentes con conceptos similares de la ingeniería de tráfico, llamaremos grado de saturación X de una parada a la razón de la demanda (buses/ hora) sobre su capacidad. La figura 2 muestra cómo este grado de saturación afecta al número de buses que hace cola para usar la parada. Para este cálculo se han utilizado supuestos sencillos de teoría de colas.

Evidentemente, hay que diseñar para un grado de saturación relativamente bajo para evitar demoras en las colas; un valor típico sería X de 0.40. La frecuencia máxima de diseño en una parada dependerá del tiempo de detención en la misma (t_s) y del grado de saturación aceptable. La

FIGURA 2
GRADO DE SATURACIÓN DE PARADAS



FUENTE: Elaboración propia.

capacidad máxima en pasajeros por hora depende de la capacidad de cada bus, $PaxB$. Para un $X_{máx} = 0.4$ la frecuencia máxima ($f_{máx}$) y la capacidad operacional (C_p) en pasajeros por hora en una parada vendrá dado por:

$$F_{máx} = \frac{0,4 \cdot 3.600}{t_s} = \frac{1.440}{t_s}$$

y

$$C_p = \frac{1.400 \cdot PaxB}{t_s}$$

Los buses bi-articulados ofrecen una mayor $PaxB$ que aumenta así la capacidad operacional de la parada. Vale la pena ahora descomponer t_s en sus partes constituyentes:

■ t_o , el tiempo muerto por vehículo: el tiempo requerido para desacelerar y parar, abrir las puertas, cerrar las puertas y dejar la parada. Estos tiempos dependen de condiciones locales y aspectos como el bloqueo de puertas si el bus está en movimiento. Tiene valores típicos de entre 8 y 15 segundos por parada.

■ t_p , el tiempo medio por pasajero que sube o baja. Este depende del número de puertas utilizables, si el acceso es a nivel o no y de si los pasajeros cancelan su pasaje al abordar el bus o fuera de él y la forma de pago que se utiliza.

El cuadro 2 ilustra valores de la capacidad operacional de diferentes tipos de vehículos, altura de plataformas y formas de pago utilizando algunos ejemplos de Londres, Sao Paulo y Bogotá. Este cuadro debe recalcularse para cada caso particular. Puede verse que la mayor capacidad la ofrecen los buses biarticulados con acceso por plataforma alta a nivel y con cancelación fuera del bus para utilizar todas las puertas simultáneamente.

Pueden establecerse otras combinaciones de forma de pago, tamaño del bus y tipo de plataforma. En el caso de Transmilenio utilizamos nuestra experiencia en el Reino Unido y Brasil para elegir buses articulados con plataforma alta (bus y parada) con acceso a nivel y pago al entrar a la estación. Aún así, la Avenida Caracas en Bogotá tiene demandas de casi 40.000 pasajeros por hora en el sentido más cargado. El cuadro 2 muestra que estas demanda no pueden satisfacerse con paradas simples, un argumento que a menudo se utiliza para justificar sistemas ferroviarios en los que las unidades pueden acoplarse para detenerse simultáneamente.

Exploramos la idea de formar convoyes, como en Porto Alegre, pero concluimos que de esta manera sólo alcanzaríamos capacidades de 20.000 pasajeros por hora. La solución final incorpora los siguientes elementos de diseño:

■ Separación de servicios expresos y convencionales de manera que no todos los buses se detienen en cada estación. Esto requiere transbordos fáciles, idealmente a lo largo de una plataforma continúa y central.

■ Diseño de estaciones en la parte media del corredor, con plataformas largas que permitan hasta cuatro buses parar al mismo tiempo.

■ Diseño de las áreas de paradas con dos carriles por sentido para permitir llegadas y salidas independientes y el paso de los servicios expresos.

Con este tipo de diseño se lograron las capacidades operacionales necesarias y una vez en operación se observaron velocidades comerciales de 27 km/h, comparables con buena parte de los tranvías modernos pero a un coste considerablemente menor.

EL IMPACTO SOBRE LA CIUDAD: TRANSMILENIO

La introducción de un sistema TMB en una ciudad significa un cambio radical en el transporte público, sus rutas y estructuras de servicios. Es importante prestar particular atención al diseño de las nuevas rutas y servicios de modo que la gran mayoría de los usuarios perciban una mejora significativa. Para ello es necesaria muy buena información sobre los patrones de viaje previos a la introducción del nuevo sistema.

En el caso de Bogotá, Colombia, la red anterior a Transmilenio contaba con más de 20,000 autobuses de varios tamaños, edades y con capacidades que iban de 15 a 72 pasajeros por unidad. Su operación estaba en manos de empresas pequeñas, la mayoría propietarias de un solo autobús. La calidad de los servicios era muy pobre pero las frecuencias muy altas. Como no había integración tarifaria la mayor parte de los viajes se realizaban utilizando un solo servicio, sin transbordos que requerían el pago de una tarifa adicional. Los viajes más largos y caros correspondían a los de las personas de menores ingresos, forzadas a vivir en las afueras de

**CUADRO 2
VALORES TÍPICOS DE CAPACIDAD OPERACIONAL
DE DIFERENTES BUSES EN PARADAS**

Vehículo	PaxB pax	t0 seg	tp seg	Capacidad Pax/h	Veh/h
Minibus, pagar al chofer	15	10	3.0	1.137	76
Minibus , pagar al chofer	35	11	3.0	1.575	45
Bus, pagar al chofer	70	12	3.0	1.867	27
Bus articulado + pago al conductor	160	13	1.5	3.777	24
Bus Biarticulado + conductor	240	14	1.5	4.019	17
Bus articulado, plataforma alta + cond.	160	13	1.0	5.120	32
Biarticulado, plataforma alta + cond.	240	14	1.0	5.574	23
Articulado, plataforma alta, pago fuera del bus	160	13	0.3	9.779	61
Biarticulado, plataforma alta, pago fuera del bus	240	14	0.3	12.169	51

FUENTE: Elaboración propia.

la ciudad pero a menudo con su trabajo en el centro de la misma.

Para diseñar el nuevo sistema basado en Transmilenio, se recolectó extensa información sobre el patron de viajes, un total de más de 370.000 registros. También realizamos un estudio de preferencias declaradas en profundidad para establecer la importancia relativa de los tiempos de caminata, espera y en los vehículos, la resistencia al transbordo y la ventaja modal de un sistema como Transmilenio. De hecho, durante estos estudios se investigó también el valor asignado a un metro ya que era un destino alternativo de inversión pública promovido por algunos sectores del gobierno.

Con esta información se preparó un detallado modelo de transporte multi-modal basado en Emme/2. Esta plataforma es ideal para evaluar elecciones de modos y rutas en grandes redes, estimar demanda y recaudación, optimizar los niveles tarifarios y reorganizar la red de autobuses remanente.

En cada caso se utilizó la siguiente función de costos generalizados de viaje para comparar el cambio entre las condiciones pre- y post-Transmilenio. Idealmente, para cada par origen-destino el coste generalizado con Transmilenio debería ser menor que sin Transmilenio:

$$GenCost = a_1 t_{access} + a_2 t_{wait} + a_3 t_{onbus} + a_4 TotFare + n \tau_{trans} + \delta$$

Aquí, a_1, a_2 y a_3 son las ponderaciones asociadas a los tiempos de caminata, espera y a bordo del vehículo. La razón a_4/a_3 se interpreta a menudo como el Valor del Tiempo Ahorrado al usar un medio. $TotFare$ es la tarifa total que paga el usuario para viajar entre su origen y destino y $n \tau_{trans}$ es la cantidad de transbordos multiplicada por la penalidad de tener que hacerlo. Finalmente, δ es la ventaja modal, si existe. Nuestro modelo fue capaz de estimar estos costos generalizados para cada segmento de renta como función de su disponibilidad a pagar por un servicio mejor.

El diseño completo del sistema requiere un proceso iterativo, ya que diferentes alternativas, incluyendo variaciones en tarifas, atraen diferentes usuarios y combinaciones de rutas. El diseño finalmente adoptado es de siete corredores troncales en Bogotá (ver figura 3, en la página siguiente), cada uno con sus servicios alimentadores. Tres de estos corredores se construyeron y pusieron en operación en menos de 18 meses desde la conclusión del estudio. Los corredores troncales tienen carriles exclusivos segregados dobles o sencillos según los niveles de demanda, las estaciones tienen plataforma alta y están en la mediana, se utilizan buses articulados con puertas a la izquierda, los usuarios pagan (*smartcards*) sus pasajes el entrar a la estación y entran y salen por todas las puertas. Se diseñó un sistema de regulación y control de servicios utilizando GPS y se contruyeron grandes estaciones y depósitos terminales. El sistema

troncal opera en concesión y su tarifa única de 0.40 euros permite cubrir los costes de los vehículos y su operación; la infraestructura, sin embargo, fue financiada por el sector público. La tarifa es la misma que cobran los servicios convencionales y permite el uso de servicios alimentadores y troncales en forma integrada (sin pagar de nuevo).

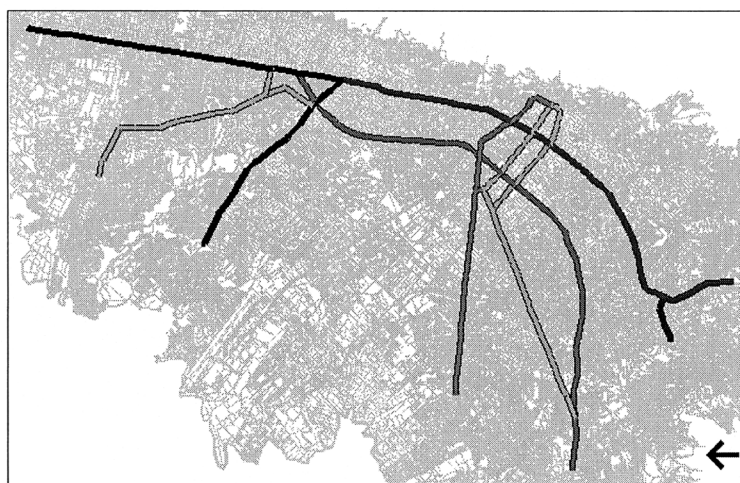
Los Bogotanos consideran a Transmilenio un éxito sin precedentes. Les ha permitido mejorar no sólo sus tiempos de viaje sino también la calidad de vida y la seguridad.

El cuadro 3 muestra los costes y beneficios de los primeros tres corredores con una longitud total de 37,5 kilómetros. Los costes medios de la infraestructura, incluyendo los terminales, puentes peatonales y el centro de control, son de 5.3 millones de euros por km. Los beneficios más importantes son los ahorros de tiempo de viaje y la reducción de emisiones y accidentes.

Transmilenio es no sólo un éxito en una ciudad difícil como Bogotá. Es también un ejemplo de lo que puede ofrecer un sistema TMB diseñado para una ciudad en funcionamiento. Un ejemplo de la forma de operar en Bogotá se muestra en la figura 3; el resto de los corredores están siendo desarrollados en la actualidad.

El diseño de Transmilenio puede funcionar bien en ciudades similares con altos niveles de demanda y donde todavía es posible diseñar carriles exclusivos dobles en los tramos más cargados. Hay pocas ciudades con esas características en el contexto europeo. Sin embargo, lo que Transmilenio ha logrado demostrar es que los avances tecnológicos (buses articulados, tarjetas inteligentes y control con GPS) y, sobre todo, el diseño inteligente de sistemas TMB, permite desarrollar un rango completo, atractivo y **sostenible** de alternativas al tranvía y al metro. Estos sistemas TMB deben considerarse seriamente, ya sea como precursores de un futuro LRT o como soluciones de trans-

FIGURA 3
LOS CORREDORES TRANSMILENIO EN BOGOTÁ



CUADRO 3
COSTES Y BENEFICIOS DE TRES CORREDORES TRANSMILENIO

Componentes de coste	Coste total millones de €	Coste por km € M/km
Carriles troncales	94,7	2,5
Estaciones	29,2	0,8
Terminales	14,9	0,4
Puentes peatonales	16,1	0,4
Talleres	15,2	0,4
Centro de control	4,3	0,1
Otros	25,7	0,7
TOTAL	198,8	5,3
Beneficios		
Ahorros de tiempo	32% por viajero	
Reducción de accidentes	más de 300%	
Cambio en emisiones	-20%	

FUENTE: Elaboración propia.

porte público de calidad que estructuren la ciudad reduciendo la dependencia futura en el automóvil.

• • • •
NOTA

(1) El coste generalizado de viajar entre dos puntos es una suma ponderada de los tiempos de viaje, espera, acceso y costos monetarios. Los factores de ponderación reflejan la importancia relativa de cada característica. Si se expresa el costo generalizado en unidades monetarias, la ponderación del tiempo de via-

je se puede interpretar como el «valor del tiempo de viaje», es decir, cuánto está dispuesto a pagar el usuario (en euros) para ahorrar un minuto de tiempo de viaje. El costo generalizado puede expresarse también en unidades de tiempo y en ese caso la ponderación de la tarifa es el inverso del «valor del tiempo». Típicamente, la ponderación de los tiempos en espera y acceso (caminata) es del orden de dos a tres veces la ponderación del tiempo en el vehículo.