

Capacidad y parámetros representativos encontrados en líneas de autobuses de transporte público urbano bajo distinta infraestructura y grado de reserva

Emilio Moreno González

Asociado de Universidad, ULA, Venezuela

Manuel Romana García y Óscar Martínez Álvaro

Titulares de Universidad, UPM, España

RESUMEN

En el presente trabajo se desarrollan dos objetivos principales; por un lado, la modelización de la capacidad en distintas líneas de transporte público urbano, en especial, autobuses articulados que circulan por vías troncales, y por otro, el análisis de los parámetros más representativos y su interrelación, en función de la infraestructura, grado de reserva y segregación del carril-bus. De tal forma, se da continuidad a comunicación precedente que intenta comparar la capacidad y parámetros obtenidos en líneas de autobuses como: Líneas 70 y 27 (EMT) que operan en Madrid, y Línea 1 del Sistema de Transporte Trolebús (STT), única línea que opera en Mérida-Venezuela. Estos sistemas constituyen rutas troncales seleccionadas bajo criterios básicos que simplifican el análisis: modo similar, que permite suprimir factores inherentes al diseño del vehículo; infraestructura de parada, que establece un contraste entre dos métodos de pago; e infraestructura en el viario, que implica distinto grado de reserva y diversos tipos de segregación del carril-bus.

Se desarrolla la metodología disponible en el *Transit Capacity and Quality of Service Manual (TCQSM)* y se realiza una evaluación sólida del tiempo de permanencia en paradas por efecto de viajeros subidos-bajados como parámetro más influyente en la capacidad, generando nuevas leyes de predicción que son consideradas luego en el ajuste metodológico. Los resultados suponen un cambio en el criterio asumido hasta ahora, de una demora en parada que crece en proporción constante a una tasa de tiempo por pasajero subido y/o bajado. El análisis estadístico determina la validez de estos modelos, y a su vez permite, obtener la máxima capacidad teórica y rango de variabilidad en cada sistema, en forma robusta. El trabajo prosigue en un proyecto más amplio para analizar la influencia de diversos grados de reserva en parámetros operativos de distintas líneas de transporte urbano.

1. INTRODUCCION

Los Sistemas de Transporte Público Urbano (STPU) desempeñan una función primordial en la movilidad de los ciudadanos en áreas metropolitanas. Su funcionamiento, y de las líneas que los componen, debe ser conocido con suficiente precisión para optimizar recursos al momento

de prestar un servicio con mayores frecuencias y capacidades importantes. Para caracterizarlos pueden emplearse varios parámetros, pero el que resulta de mayor utilidad en la organización y seguimiento de los servicios, es la capacidad de la línea. Es decir:

“el máximo número de pasajeros que puede ser transportado con certeza razonable a lo largo de un tramo o sección crítica de la ruta, durante un período de tiempo dado, bajo unas condiciones de explotación específicas, sin que se experimenten demoras, riesgos o restricciones imprevisibles” (Kitellson et al., 2003)

En ella influyen aspectos tales como el número de viajeros que suben y bajan del autobús en cada parada, e interferencia de la línea con el resto del tráfico, entre otros. Un modo de minimizar esta interferencia es dotar a la plataforma del STPU de un cierto grado de reserva; desde nula, en autobús que circula por calle normal, hasta máxima, en tranvía con plataforma exclusiva totalmente segregada. Existiendo una gran variedad de situaciones intermedias en cuanto a la delimitación del carril-bus que puede darse con: marcas viales, elementos de balizamiento de tráfico, etcétera. En este sentido, el trabajo muestra la evaluación de la capacidad en líneas con distinto grado de reserva de plataforma, lo que conlleva un análisis profundo para cuantificar su variabilidad en función de la demanda en paradas, un aspecto que permite, mejorar la estimación de la demora producida en cada parada por subida y bajada de viajeros al obtener nuevas leyes que predicen su comportamiento, y a su vez, ajustar la metodología de cálculo de la capacidad.

Los STPU estudiados constituyen sistemas de autobús en vías troncales con alta concentración de demanda, lo que garantiza una evaluación sólida de la demora por pasajeros subidos y bajados en la parada. Estos sistemas son seleccionados bajo criterios esenciales: distinta infraestructura –tanto en viario como en parada– lo que precisa el grado de reserva, método de pago y tipo de segregación del carril-bus. Se trata de líneas con suficiente longitud, con una amplia gama de grados de reserva y distintos tipos de segregación. Entre ellas se encuentran: Línea 70 de la Empresa Municipal de Transportes de Madrid (EMT), como el caso más desprovisto de infraestructura, que circula en carril de tráfico mixto; Línea 27 (EMT) considerada de nivel medio, dada su condición de carril semi-reservado; y Línea 1 del Sistema de Transporte Trolebús de Mérida-Venezuela (STT) con total reserva del carril, representando el mayor nivel de infraestructura. Estas líneas utilizan el mismo tipo de vehículo –autobús articulado–, lo que permite suprimir factores de influencia inherentes a su propio diseño y facilita la evaluación independiente del proceso de transferencia de viajeros y método de pago, admitiendo una comparación más uniforme de la demora y su umbral de demanda.

La curva de capacidad obtenida aplicando la metodología de cálculo TCQSM con un valor medio fijo de demora, no define el rango de variabilidad que suele darse en sistemas de transporte que interactúan con una demanda variable. En consecuencia, los modelos de predicción resultantes son útiles en la estimación no sólo de un valor máximo, sino, mejor aún, del rango de variabilidad

de la capacidad en función de la demanda en parada. Adicionalmente, las técnicas de muestreo implementadas en cada recorrido de la línea son herramientas de sencilla aplicación que facilitan, por un lado, datos suficientes para medir las demoras, y por otro, la cuantificación de la variabilidad en el parámetro velocidad según el elemento físico de segregación del carril-bus, un aspecto importante, que incide en la fiabilidad del servicio. La evaluación de la velocidad en cada infraestructura conduce a la determinación del elemento físico de segregación más eficiente para atenuar su variabilidad, y otros factores de demora en torno a la parada en combinación con la afectación del semáforo próximo, sugieren recomendaciones, aún cuando este efecto de demoras combinadas, por su complejidad, requiera más estudio. Los resultados son de gran utilidad para quienes planifican y gestionan el transporte por autobús en ámbito urbano, ya que se establece una sólida categorización de la infraestructura según la capacidad y los parámetros representativos más importantes. Las curvas de capacidad en función de la demanda sirven de apoyo en la toma de decisiones y correcta implantación de este tipo de sistemas en lugares donde se tiene cierto valor de demanda. Un análisis estadístico exhaustivo y riguroso demuestra la validez de las leyes de demora, en concreto, se comprueba el alcance de la metodología TCQSM en entornos fuera de los EE.UU. al demostrar que las leyes de predicción de demora divergen del modelo lineal, y tienen según los resultados, alta probabilidad de generalización bajo condiciones similares de transferencia de viajeros.

2. SISTEMAS DE TRANSPORTE PÚBLICO URBANOS ANALIZADOS

Se establece un nivel de infraestructura en orden ascendente, donde destaca cada STPU según los aspectos relevantes de análisis como: grado de reserva, elemento de segregación, método de pago, proceso de transferencia de viajeros y control. Véase la Tabla 1.




STPU	Infraestructura				Descripción fotográfica
	Reserva del carril	Segregación del carril	Método de pago	Transferencia de viajeros	
Línea 70 (EMT)	Sin reserva, tráfico mixto + intersecciones	No definida	Validación del billete (adentro)	Ascenso por puerta delantera y descenso por puertas traseras	
Línea 27 (EMT)	Semi- reserva: taxis y motos + intersecciones	Balizas, marcas continuas y discontinuas	Validación del billete (adentro)	Ascenso por puerta delantera y descenso por puertas traseras	
Línea 1 (STT)	Total reserva + intersecciones	Bordillo e isleta continua	Prepago (afuera)	A/D por todas las puertas	

Tabla 1 – Infraestructura disponible en los sistemas de transporte analizados

La infraestructura disponible en parada define dos métodos de pago en específico: adentro y fuera del autobús. Análogamente, el proceso de transferencia de viajeros es determinado por el diseño o tipo de infraestructura en parada de cada STPU. Véase la figura 1.

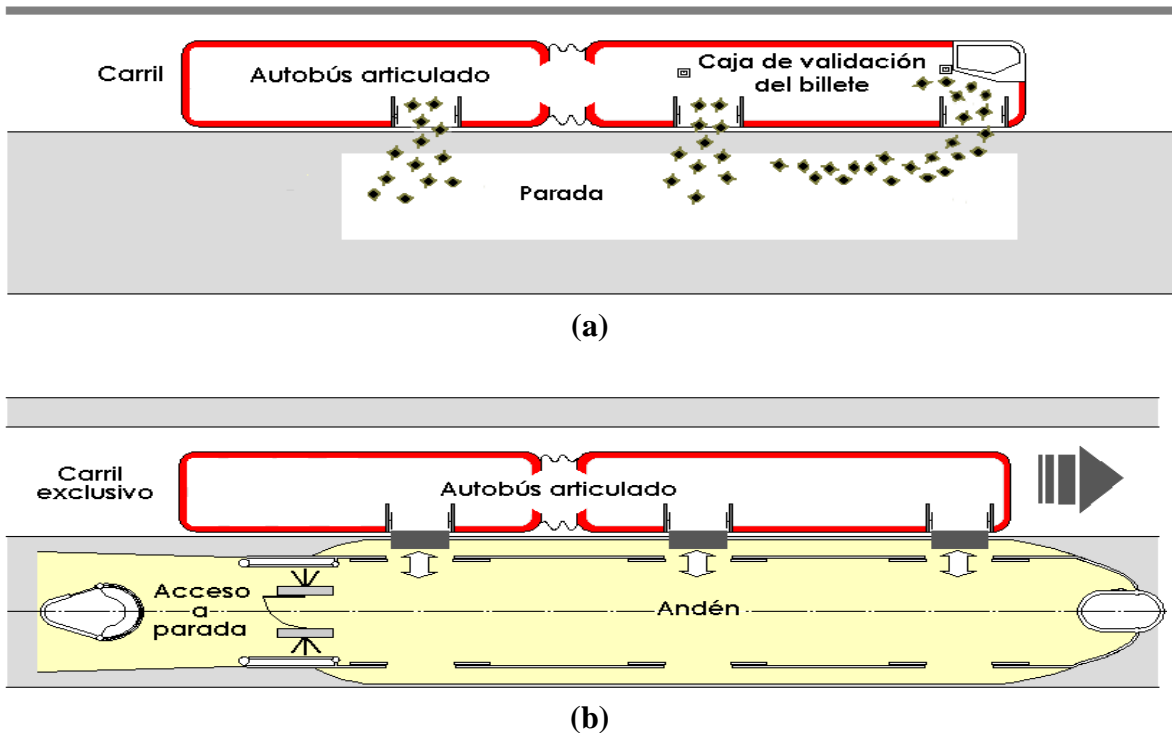


Fig. 1 – Infraestructura en parada: (a) caso líneas 70 y 27 - EMT; (b) caso línea 1 - STT

En general, las características medias de una línea EMT representa 8,24 km de longitud y 25 paradas por sentido; lo que corresponde a una longitud media entre paradas de 343 m, mientras que la distancia media que recorre un viajero es de 3,1 km (CRTM, 2008). El modo de transporte utilizado son autobuses articulados de piso bajo con muy poca diferencia de altura entre el vehículo y andén. La potencia de tracción es suministrada por motor de combustión interna. La línea 70 es una línea periférica con mayor frecuencia de paso en días laborables, dado que une entre sí zonas no comunicadas directamente por la red de Metro de Madrid y vertebrada “Ciudad Lineal”. Tiene un grado de reserva de plataforma muy escaso y circula por viario de distinta clase, desde calles residenciales a vías arteriales con restricción de aparcamiento.

La línea 27 tiene una elevada demanda, y circula por todo el centro de Madrid, a lo largo de vías arteriales de gran capacidad, el carril se presenta en condición semi-reservada al permitir el tránsito de taxis y motos. Asimismo, la plataforma tiene distinto tipo de segregación: bordillos continuos en sectores sin accesos laterales; combinación de aletas y bordillo en parada de configuración continua; aletas interrumpidas en zonas con accesos laterales; y marcas, un elemento más vulnerable que no impide el acceso de otros vehículos al carril. Tiene una media de 22 autobuses al día y transporta alrededor de un millón de viajeros al mes, siendo una de las que más gente mueve en toda España.

La línea 1 del sistema Trolebús es análogamente un autobús articulado cuya potencia de tracción es fundamentalmente eléctrica, aunque cuenta con un motor de combustión interna en caso de emergencia. Va en carril totalmente reservado y segregado del resto del tráfico en cada sentido, tiene 10,3 km de longitud y recorre la parte central del núcleo urbano de la ciudad de Mérida-Venezuela. Las paradas se encuentran espaciadas a una distancia promedio de 730 m y están sobre-elevadas en isleta central admitiendo el estacionamiento de un vehículo por sentido a cada lado de la parada, diseño, que no permite el adelantamiento en paradas. Las operaciones de transferencia de pasajeros supone la conexión del vehículo con el andén mediante rampas retráctiles que garantizan el acceso a nivel de los viajeros.

3. METODOLOGÍA

En este apartado se evalúan tres aspectos clave para el desarrollo del trabajo: selección de la metodología de cálculo; método de captación de datos y diseño del muestreo:

3.1 Metodología de cálculo

De la revisión del estado del arte sobre distintas metodologías disponibles para el cálculo de capacidad encontramos como más difundida, y mejor sustentada científicamente, la resumida en el TCQSM. Constituye un modelo determinista, desarrollado a partir de la fórmula concebida para medir la intensidad de tráfico en el acceso a una intersección según el Highway Capacity Manual (1985 y 1994), que es ajustado para estimar la variabilidad de la demora en parada según un coeficiente de variabilidad “Cv”; la probabilidad de parada ocupada –tasa de fallo– “Za” (Jacques and Levinson, 1997); el efecto de semáforo próximo “g/C”; y otros ajustes que son simplificados, por no presentarse estos efectos en los sistemas analizados. De tal forma, la capacidad en el carril-bus se obtiene mediante la ecuación (1), donde los parámetros “dp” y “td” representan, la demora media en parada y el tiempo de despeje medio, respectivamente.

$$C_{cb} = \frac{3600(g/C)}{t_d + (g/C)d_p + (Z_a C_v d_p)} \quad (1)$$

El citado modelo permite evaluar la capacidad en distintos sistemas de transporte por autobús, tanto si se presenta o no, la condición de carril reservado.

3.2 Captación de datos

Una vez se precisan los parámetros esenciales para la aplicación de la metodología de cálculo, se recogen datos suficientes que garanticen el propósito de análisis. Así, se propone un plan general que incluye: Inventario de la ruta, emplazamiento de paradas y demás detalles del viario; Registro de la demora en el proceso de transferencia de viajeros en cada parada y la estimación de otras demoras en cada recorrido –por intersección y tráfico– con anotación de cada incidencia; Determinación de la velocidad en forma simultánea a los datos de demora;

Ampliación de los datos de demora por transferencia de viajeros, por semáforo y otros factores, en paradas de mayor demanda; Segmentación del viario en tramos de infraestructura homogénea, enfocando el análisis por tramo uniforme en cuanto a condiciones físicas y operacionales.

En virtud de lo extenso que puede resultar la captación de datos considerando las distintas líneas, y del coste elevado que ésta pueda representar, se aplica un muestreo que permita la inferencia del comportamiento de cada parámetro y finalmente de la capacidad. Los datos deben ser bien estructurados y controlados para asegurar la aleatoriedad pertinente. En concreto, se proponen dos observadores a bordo del vehículo y el uso de tecnología GPS para la estimación del parámetro velocidad en forma simultánea, un parámetro que será calibrado con datos del tiempo llevados manualmente.

3.3 Muestreo

Se pretende generalizar los resultados de la muestra a una población, y se estudia en particular, un conjunto de datos a los que tenemos acceso. Este proceso de inferencia se realiza mediante métodos estadísticos fundamentados en la probabilidad. Algunas razones para aplicar el muestreo son: Ahorro de tiempo y menos coste; Estudiar la población bajo una característica determinada que en muchas ocasiones es una tarea inaccesible o imposible de realizar y; Elevar la calidad del estudio al disponer más tiempo y recursos, las observaciones y mediciones pueden ser más exactas y plurales que si las tuviésemos que realizar a la población. En suma, el muestreo se realiza en dos fases: una exploratoria, para definir la dispersión de los parámetros velocidad de recorrido “Vr” y demora en parada “dp” observados, y otra definitiva, para ampliar la muestra y llevar el error cometido a valores admisibles.

El tamaño mínimo “n” y el error máximo cometido se obtienen mediante aplicación de la *distribución normal* para un nivel de confianza del 95 %, considerando un adecuado porcentaje de observaciones. Véase estos resultados del muestreo en la tabla 2.

Parámetro	Línea 70 - EMT		Línea 27 - EMT		Línea 1 - STT	
	Vr (km/h)	dp (s)	Vr (km/h)	dp (s)	Vr (km/h)	dp (s)
error máximo (ε)	± 2,0	± 8,0	± 2,0	± 8,0	± 2,0	± 5,0
desviación obs (S)	2,27	21,68	2,31	10,7	± 2,0	± 9,0
tamaño mínimo (n)	5	28	5	7	4	13
muestra def (n)	30	854	30	622	30	46
desviación def (S)	1,86	11,9	1,85	14,0	2,0	6,9
error absoluto (ε)	± 0,7	± 0,8	± 0,7	± 1,1	± 0,7	± 2,0
error relativo (ε)	± 0,046	± 0,048	± 0,056	± 0,05	± 0,037	± 0,054

Tabla 2 – Resultados del muestreo en dos fases: exploratoria y definitiva

4. ESTIMACION DE LA DEMORA EN PARADA Y PARÁMETROS PRINCIPALES

Una vez se cumplen la fase metodológica, de muestreo e inferencia estadística, se obtienen los parámetros principales en cada sistema de transporte mostrados en la tabla 3.

STPU	Parámetros principales		
	Demora media en parada, dp (s) (modelos de predicción encontrados)	Tiempo de despeje, td (s)	Coefficiente de variabilidad de la demora, Cv
Línea 70 EMT	$d_s = 6,29996 \times N_s^{0,65162}$	9* 14,6**	0,70
Línea 27 EMT	$d_s = 6,2864 \times N_s^{0,6523}$	6,83	0,60
Línea 1 STT	$d_{S/B} = -0,0046N^2 + 0,6447N + 34,222$	7,2	0,20

(*) Tiempo de despeje en parada simple. (**) Tiempo de despeje en parada múltiple

Tabla 3 – Parámetros principales en cada STPU analizado

Es importante destacar algunos aspectos que se desprenden del análisis de estos parámetros mostrados en la tabla 3; la demora en parada no sigue un modelo de comportamiento lineal en ningún caso; la alta variabilidad de la demora experimentada después de cierto umbral de demanda hace que los modelos potenciales sean el ajuste más adecuado en las líneas EMT. La línea 1 STT, por su parte, presenta muy poca variabilidad en la demora, el ajuste cuadrático experimenta una tendencia a menor crecimiento de la demora a medida que aumenta la demanda de viajeros en parada, un efecto distinto al comportamiento mostrado por los modelos de las líneas EMT. Esto obedece esencialmente, a que el STT usa todas las puertas del autobús en las operaciones de transferencia de viajeros, por tanto, el modelo encontrado permite una mejor representación de este proceso de transferencia específico y demuestra la ventaja operativa del método pre-pago, comparativamente.

De estudio reciente se comprueba, que el comportamiento de demora que crece en proporción constante a una tasa de tiempo unitario por pasajero subido y/o bajado presenta problemas al no cumplir las hipótesis de homocedasticidad y normalidad necesarias que validen este modelo. En este caso, una transformación logarítmica fue aplicada a los datos para solucionar el problema, lo que determina modelos potenciales como mejor ajuste (Moreno et al., 2012). De esta forma, se obtiene un comportamiento de demora en función de la demanda en parada más representativo y uniforme en cada sistema. El doble valor encontrado para el tiempo de despeje en línea 70 - EMT, refleja el valor medio encontrado en dos tipos de paradas, es decir, una media de 9 s en paradas simples, y otra de 14,6 s, en paradas con funcionamiento más complejo por presencia de múltiple zona de carga y/o bloqueos a la salida, lo que determina más adelante, dos curvas de capacidad para estimar cada situación en el caso de línea 70.

Otra apreciación interesante, constituye el valor similar alcanzado en el tiempo de despeje en los tres sistemas analizados, sobre todo en el caso de parada simple. Esta similitud demuestra que los parámetros operativos de puesta en marcha son independientes de la tecnología de propulsión utilizada en cada sistema. Finalmente, el coeficiente de variabilidad de la demora en parada demuestra mayor variabilidad en los casos EMT, con un 40 y 50 % más que lo mostrado en línea 1- STT, impulsado por su mayor grado de reserva.

Previamente a la definición de la capacidad, se puede establecer un contraste de todos los comportamientos para evaluar la demora en parada, con la finalidad de precisar el umbral de demanda para el cual un sistema de transporte pueda resultar más eficiente. Véase la figura 2.

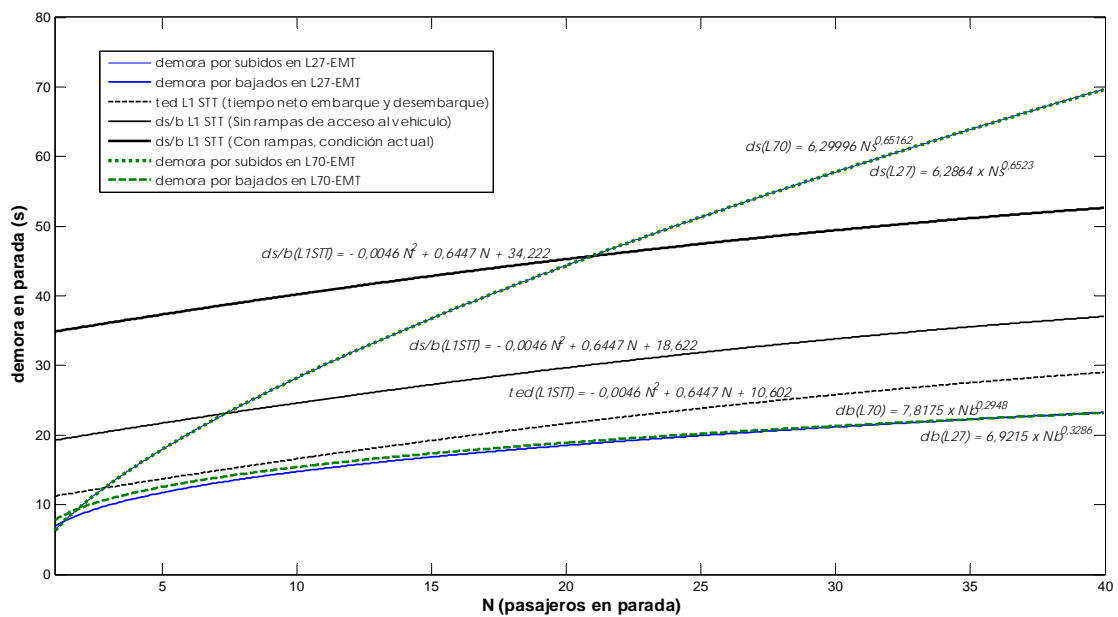


Fig. 2 – Demora en parada en función de la demanda. Todos los casos de líneas.

Haciendo un análisis sobre los resultados obtenidos en la figura 2 observamos que no existe diferencia notoria en el comportamiento de demora en parada entre las líneas 70 y 27 de la EMT, tanto en el caso de subidos como de bajados. Por el contrario, una diferencia más clara se observa si comparamos ambos casos EMT con el comportamiento de línea 1 - STT. Asimismo, se puede ver que si la demanda en parada crece a partir de cierto valor crítico – umbral de 20 pasajeros– la infraestructura del STT tiende a ser más eficiente que aquella representada por las líneas EMT. Esto demuestra, que el tipo de infraestructura STT resulta ventajoso si la demanda en parada es superior a veinte (20) pasajeros, un aspecto clave, para optar por un sistema similar en rutas troncales urbanas. Por otro lado, cuando la demanda en parada es gestionada por debajo de este umbral crítico señalado, la infraestructura representada por las líneas de autobús EMT demuestra mayor eficiencia en el tiempo empleado por transferencia de viajeros. En este sentido, evaluando los datos encontrados en línea 70 – EMT detectamos una demanda en parada de 5 a 20 pasajeros el 86,36 % de la muestra, lo que supone un esfuerzo importante de gestión que mantiene la demanda en parada

por debajo del umbral crítico. En el caso de la Línea 27 – EMT se dan valores similares de 4 a 20 pasajeros el 97,43 % de las veces.

La demora alta observada en el STT para el rango inferior a veinte pasajeros en parada, obedece al tiempo medio empleado en accionamiento de puertas (8,02 s) y por recogida de rampas de acceso al vehículo (15,6 s), que en total suman 23,62 s. Representa un tiempo gastado en el proceso que sumado a la demora por flujo neto de pasajeros subidos y bajados “ted” determina la demora media en parada. El tiempo total gastado en este proceso previo será entonces, independiente del número de pasajeros presentes en la operación, un valor de 34,22 s si sumamos el tiempo de regulación de 10,6 s reflejado en la parte no explicada del modelo de tiempo por flujo neto de pasajeros “ted” encontrado.

5. CAPACIDAD BAJO DISTINTO TIPO DE INFRAESTRUCTURA

Un ajuste en la capacidad por semáforo próximo a la parada es inducido para garantizar una representación más adecuada. Sin embargo, al ajuste por verde efectivo aplicado en el denominador de la ecuación (1) podría ser mal interpretado en casos donde la probabilidad de retención por semáforo es alta, según lo observado en campo. Análogamente, este efecto puede variar a medida que aumenta el número de zonas de carga en la parada como puede comprobarse en el propio manual TCQSM, donde los resultados señalan una disminución del efecto de semáforo en la capacidad a medida que se amplía el número de zonas de carga en paradas de configuración lineal.

Este aspecto requiere por tanto, mayor estudio, dada las distintas configuraciones de parada que pueden darse en la práctica, una situación que merece ser explorada en profundidad, ya que constituye una propuesta interesante que puede llevar a catalogar el tipo de parada más apropiado para cierto tipo de intersección según la capacidad. No obstante, se requieren datos más detallados y el uso de micro-simulación, que facilite el planteamiento de los distintos escenarios, cuestión que escapa de nuestro análisis. En consecuencia, la capacidad mostrada no incorpora el efecto de semáforo próximo a la parada, un aspecto aún no muy claro en la citada metodología.

La figura 3, muestra el comportamiento de la capacidad aplicando la metodología TCQSM que es ajustada mediante los modelos de predicción de demora encontrados, en lugar de, una demora media fija en parada. Como una limitación de estas curvas, la capacidad es función de la demanda observada en paradas intermedias de rutas troncales urbanas con predicción de hasta 40 pasajeros transferidos –valor máximo observado–. Las paradas terminales o cabeceras de línea representan operaciones distintas, que en muchas ocasiones obedecen a regulación de tiempos, frecuencias y gestión del servicio, factores que no fueron estudiados.

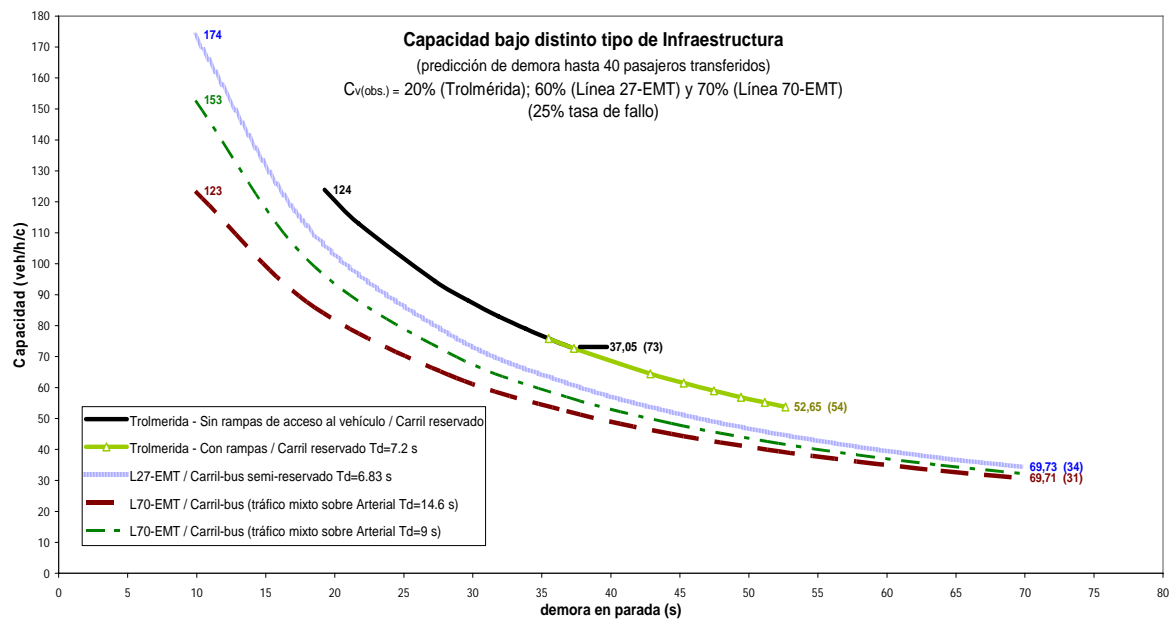


Fig. 3 – Modelización de la capacidad según tipo de infraestructura

Las curvas de capacidad demuestran claramente el aumento del parámetro de acuerdo a un cierto nivel de infraestructura. El “tiempo de despeje” tiene poca variabilidad comparando el valor obtenido entre carril reservado y semi-reservado, no así en el caso sin reserva, donde se muestran dos valores medios que están en correspondencia a distinto funcionamiento de la parada: simple –una zona de carga–; y múltiple –más de una zona de carga– con mayor probabilidad de bloqueo a la salida –el conductor espera brecha en carril adyacente para salir–. En general, la variabilidad del tiempo de despeje influye poco en la capacidad cuando se tiene alta demanda considerando los resultados alcanzados en sus valores extremos. Los valores máximos de capacidad, y en consecuencia, el intervalo mínimo requerido “I” para alcanzar estas intensidades, son igualmente mostrados en la tabla 4.

Capacidad y parámetros asociados					
STPU	I mínimo (s)	Td (s)	Cv	Cap (bus/h/c)	Cap (pas/h/c) *
Línea 70 - EMT	70	9	0,70	32	4480
		15		31	4340
Línea 27 - EMT	70	7	0,60	34	4760
Línea 1 - STT	53	7	0,20	54	7560

(*) Asumiendo 140 viajeros por unidad de autobús articulado.

Tabla 4 – Capacidad y parámetros asociados a los distintos sistemas de transporte.

Algunos valores han sido redondeados para dar facilidad de interpretación a los parámetros mostrados desde el punto de vista comparativo. Asimismo, la capacidad en número de personas transportables es obtenida tomando una cantidad máxima de viajeros por autobús articulado de 140 pasajeros, bajo condiciones relativas de confort. La capacidad alcanzada

resulta similar en ambos casos de líneas EMT cuando se tiene alta demanda, y en el caso del STT, casi duplica el valor de capacidad hallado en las líneas 70 y 27.

6. ANALISIS DE PARÁMETROS CIRCULANDO

En cualquier sistema de transporte público urbano es de vital importancia mantener buenos estándares de servicio que garanticen la movilidad de los viajeros en ciudades congestionadas. Por otra parte, los usuarios valoran la calidad del servicio según el parámetro velocidad que define tradicionalmente la eficiencia del sistema. Conocer el desempeño de este parámetro no sólo ayuda a la gestión operativa, sino que además, permite la ubicación de puntos o sectores con mayor problema por elevadas demoras. Existen muchos métodos para medir la velocidad, entre los de uso más frecuente están: detectores de lazo, contadores electrónicos, radares, combinación de video cámaras y radares, entre otros. Estos dispositivos son denominados detectores fijos y tienen limitaciones en cuanto a la captación de la velocidad punto a punto sobre la ruta. En consecuencia, surge la necesidad de aplicar receptores GPS a bordo del vehículo como método de captación de datos, método en amplia difusión, y que representa una alternativa frente a los altos costes de instalación y mantenimiento de los detectores fijos.

La metodología telemática propuesta permite realizar el diagnóstico de operaciones en la ruta de forma rápida y sencilla. La validación del método requirió, por un lado, la medición de la velocidad con receptor de señal GPS en modo de navegación absoluta y configurado bajo el sistema de aumento de precisión WAAS/EGNOS para proveer en tiempo real correcciones diferenciales; y por otro, un registro de datos manual realizado en paralelo con la finalidad de calibrar la medición telemática. Así, se consiguen resultados satisfactorios, lo que define las bondades y cambios cualitativos proporcionados por este método telemático para medir el desempeño de la velocidad.

Los análisis determinan que la velocidad obtenida sólo requiere corrección por aumento de distancia recorrida cuando se detiene el autobús. No obstante, la no coincidencia del trazado GPS con el eje del viario puede influir en el parámetro velocidad cuando ocurren distorsiones notorias por una localización extremadamente errónea de la ruta, y esto último, depende intrínsecamente de la disponibilidad selectiva de señal –SA, de las siglas en inglés– al momento de realizar la medición, u otros factores no corregibles. En suma, se puede comprobar que la localización de ruta se ajusta razonablemente al eje del viario cuando el autobús está en movimiento, es precisamente esta primera identificación, la que permite definir claramente las demoras dentro de los registros y localizar los puntos donde se debe aplicar la corrección por aumento de distancia. Los registros de velocidad inconsistente –valores ilógicos de velocidad– dada su baja frecuencia de ocurrencia, constituyen un problema menor, que puede corregirse aplicando el promedio de las velocidades contiguas al punto considerado.

Los datos de velocidad captados con receptor GPS requieren un adecuado post-procesamiento para reducir el error cometido en la base de datos inicial, el cual se encontró en el orden de un 7 % bajo condiciones de poca interrupción en el viario –línea 1 STT–; y un 12 % para los casos con mayor interrupción –líneas 70 y 27 EMT–. Estos porcentajes surgen del promedio de las diferencias obtenidas entre la velocidad de recorrido medida manualmente y la velocidad GPS en cada recorrido. Los tiempos de parada registrados en forma manual fueron llevados de forma sincronizada con el reloj GPS, lo que permitió calibrar el resultado en posterior, logrando un descenso sustancial del error hasta menos del 1%. En consecuencia, se obtiene una vasta y potente base de datos con registros de velocidad a cada segundo para cada recorrido. La figura 4, muestra la excelente correlación alcanzada entre la velocidad real medida manualmente y la obtenida con GPS una vez corregida, lo que valida el método telemático. El resultado compila los datos provenientes de todas las líneas, representando una muestra de 190 recorridos en total.

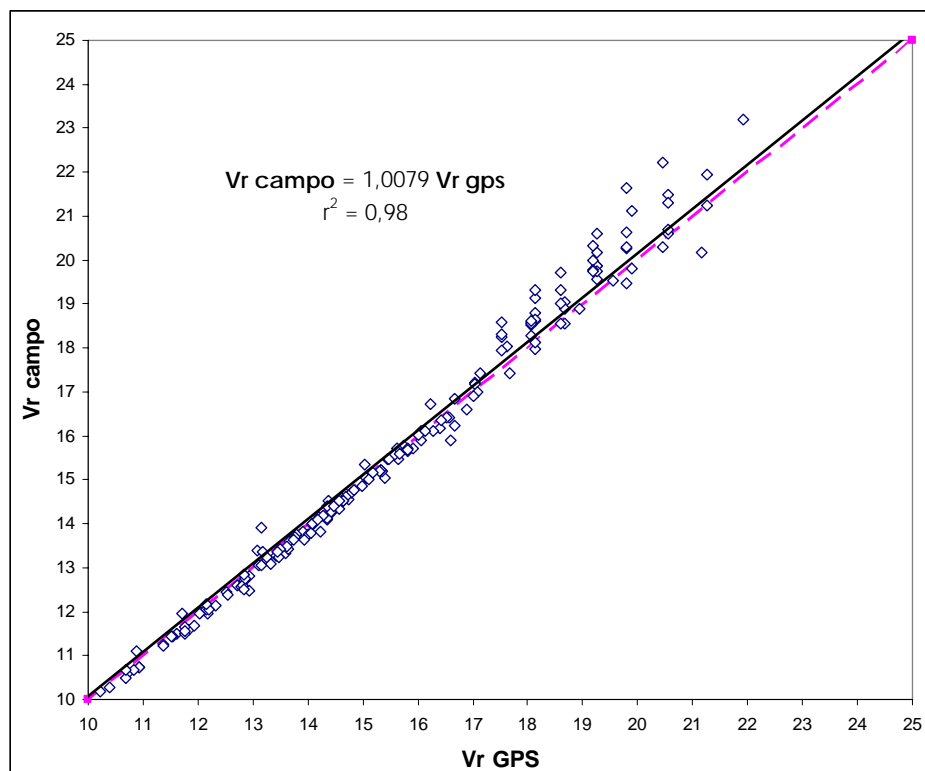


Fig. 4 – Validez de los datos de velocidad obtenidos con GPS

Dado el gran tamaño de estos registros de velocidad, se hace difícil su agrupación de forma manual, que permita el enfoque de la variabilidad por tramos homogéneos. De tal manera que, para tener una segmentación por tramo homogéneo que sirva como primera base de clasificación, se requieren métodos exhaustivos para el agrupamiento de los datos. El propósito es, utilizar técnicas de agrupamiento que identifiquen los grupos de velocidad homogénea dentro del conjunto de datos y generar una representación concisa del parámetro.

En este sentido, la herramienta *fuzzy c-means* (FCM) es una entre tantas técnicas avanzadas de agrupamiento, introducida originalmente por Bezdec (1981), que permite a una base de datos grande ser clasificada en clusters –grupos– donde cada punto pertenece a un centro de cluster.

Para la aplicación de la función de lógica difusa se debe tener una conjetura inicial del número de centros clusters requeridos. Así, mediante la inspección al modelo de velocidad versus distancia antes de ejecutar la función, ayuda a resolver este inconveniente de partida. La función FCM calcula la posición media o centro de cluster y adjudica a cada punto un grado de pertenencia a un centro cluster. Luego, por actualización iterativa de los centros cluster y grado de pertenencia de cada punto, la FCM desplaza los cluster a la posición correcta. Esta iteración se basa en la reducción al mínimo de una *función-objetivo* que representa la distancia desde cualquier punto a un centro cluster, ponderada por su grado de pertenencia. Los resultados de este análisis se resumen en la tabla 5, donde la *función-objetivo* es minimizada suficientemente en 100 iteraciones, obteniéndose los clusters de velocidad para cada segmento de desempeño homogéneo.

STPU	Sentido hacia	Segmento (km)	Cluster de velocidad (km/h)	Demora (min/km)	V recorrido media (km/h)
L70 -EMT	San Blas	0 – 2,5	14,9	1,7	14,2
		2,5 – 5,4	14,6		
		5,4 – 8,7	13,1		
L70 -EMT	Plaza Castilla	0 – 2,2	17,1	1,5	14,8
		2,2 – 4,6	12,2		
		4,6 – 7,3	13,1		
		7,3 – 9,8	16,8		
L27 -EMT	Plaza Castilla	0 - 2,4	11,5	2	13,2
		2,4 – 5,2	13,2		
		5,2 – 8,7	14,98		
	Gta. Embajadores	Total	14,0	2	14,0
L1 -STT	Noreste	0 – 2,0	12,8	1	19,4
		2,0 – 5,2	30,7		
		5,2 – 8,0	16,7		
		8,0– 10,3	17,5		
	Suroeste	0 – 2,0	14,6	1	19,0
		2,0 – 5,2	16,1		
		5,2 – 8,0	29,3		
		8,0 –10,3	16,1		

Tabla 5 – Resultado del análisis Cluster FCM aplicado a los datos de velocidad GPS

Existe poca variabilidad de la velocidad entre segmentos homogéneos de líneas EMT y mayor variabilidad en el STT. La distancia entre paradas y elevada retención por semáforo en líneas EMT determinan menor desempeño con demora media de 1,8 min/km y velocidad de 14 km/h.

La velocidad es un parámetro muy valorado, el conocimiento sobre el origen de su variabilidad es de gran interés para quienes gestionan el transporte (Jacques y Levinson, 2000). En este sentido, se analiza la variabilidad según la infraestructura, grado de reserva y tipo de segregación del carril-bus. Asimismo, se estudia el parámetro en cada tramo mediante reconocimiento previo del carril-bus para lograr la segmentación en tramos homogéneos. Los resultados de este análisis se muestran en la tabla 6 y figura 5.

Ti	Tipo de Infraestructura	M	S	M + 2S	M - 2S	Cv
1	Carril en calle, sin reserva, 1c (J. A. Armona - Delicias) L-27	24,3	2,8	29,83	18,72	0,11
2	Carril-bus, semi-reservado, aletas-pintura + tráfico mixto (P Cibeles - P Colón) L-27	25,2	2,8	30,71	19,67	0,11
3	a Carril en arterial, sin reserva, 2c x sentido (Caidos Division Azul) L-70	28,7	3,5	35,63	21,76	0,12
	b Carril en arterial, sin reserva, 2 y 3c x sentido (Arturo Soria) L-70					
	c Carril en arterial, sin reserva, 2 y 3c x sentido (Mateo Inurria) L-70					
	d Carril en arterial, sin reserva, 3c x sentido (R. de Valencia - R. de Atocha) L-27					
	e Carril en arterial, sin reserva, 3c x sentido (Hnos G Noblejas) L-70					
	f Carril en arterial, sin reserva, 5c (Paseo de las Delicias) L-27					
4	Carril-bus, semi-reservado, aletas discontinuas (L-27))	29,4	3,5	36,53	22,34	0,12
5	Carril-bus, semi-reservado, aletas continuas y bordillo (L-27)	30,5	2,1	34,63	26,34	0,07
6	Paso sobre M30, arterial expresa de 3c x sentido (C. D. Azul - C. S. Corazón) L-70	34,7	4,9	44,44	24,98	0,14
7	Carril-bus, reservado, bordillo continuo (STT -Trolmerida)	36,0	2,2	40,35	31,64	0,06

M: Media de la velocidad S: Desviación Estándar Cv: Coeficiente de variabilidad de la velocidad (medida más efectiva para comparar distintas Infraestructuras)

Tabla 6 – Análisis de variabilidad de la velocidad según infraestructura.

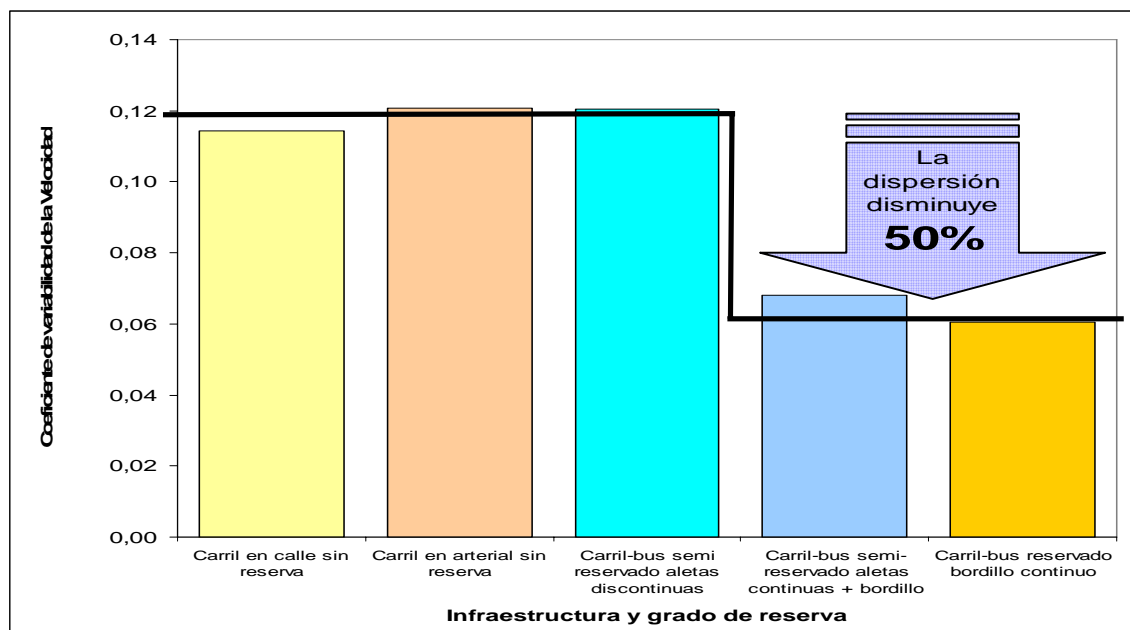


Fig. 5 – Efecto de la infraestructura, grado de reserva y tipo de segregación, en la variabilidad del parámetro velocidad

El uso de infraestructura con carril segregado disminuye un 50% la dispersión encontrada en el parámetro velocidad de los casos no segregados. Las aletas colocadas en forma discontinua es una medida poco efectiva para atenuar la dispersión del parámetro. Asimismo, se observa buen comportamiento de las aletas continuas más bordillo en el carril semi-reservado, mostrando una dispersión pequeña, equiparable, a la observada en infraestructura de mayor nivel de segregación, representada por el carril-bus reservado y bordillo continuo.

CONCLUSIONES

1. El número de pasajeros subidos es determinante en el tiempo de permanencia del autobús en la parada de líneas EMT.
2. Un modelo potencial de demora conjunto puede ser propuesto, como caso de generalización, dada la alta similitud de los ajustes alcanzados en las líneas EMT.
3. Se determina el umbral de demanda en parada de 20 pasajeros, para el cual, la aplicación de cierta infraestructura (EMT, o bien, STT) alcanza mayor eficiencia en el parámetro demora.
4. Pasar del método de pago actual (caja de validación del billete) a un sistema de pago sin contacto en las líneas EMT, puede mejorar el comportamiento de la demora en parada, a tal punto, que sea similar a aquella obtenida en el STT sin considerar el tiempo perdido por efecto de rampas de acceso al autobús.
5. La capacidad del STT duplica el valor alcanzado en los casos EMT, las afectaciones por semáforo y problemas de ocupación de parada, entre otras fricciones, hacen que disminuya notoriamente la capacidad en los sistemas EMT, a pesar, del buen desempeño observado en las operaciones de transferencia de viajeros.
6. El método telemático para captación del parámetro velocidad, puede ser aplicado en el diagnóstico de operaciones de líneas de transporte público urbano, de acuerdo a los resultados alcanzados.
7. El elemento físico de segregación del carril-bus dispuesto en forma continua resulta eficaz para atenuar de la variabilidad del parámetro velocidad. Los resultados demuestran, que la dispersión disminuye 50 % de lo encontrado en los casos sin segregación. La condición semi-reservada, en este caso, no incide en la variabilidad del parámetro.

REFERENCIAS

- BEZDEC, J.C. (1981). Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms. Plenum Press. New York.
- CONSORCIO REGIONAL DE TRANSPORTES DE MADRID (CRTM). *Madrid 2007-2008 referente mundial*. Abril 2008. pp 16-19
- JACQUES, K. and LEVINSON, H. (1997). Operational Analysis of Bus Lanes on Arterials. TCRP Report 26. TRB. National Academy Press. Washington, DC. Available on line at http://gulliver.trb.org/publications/tcrp/tcrp_rpt_26-a.pdf

- JACQUES, K. and LEVINSON, H. (2000). Operational Analysis of Bus Lanes on Arterials: Applications and Refinements. TCRP Research Results Digest No. 38. TRB. National Research Council. Washington, DC. September.
- KITTELSON & ASSOCIATES, INC. (2003). *Transit Capacity and Quality of Service Manual (TCQSM)*. 2nd Edition. Transit Cooperative Research Program. TRB. Washington D.C.
- MORENO, E., MARTINEZ, O. y ROMANA, M. (2008). Caracterización de un sistema de transporte trolleybus en plataforma reservada. *VIII Congreso de Ingeniería de Transporte, 2-4 Julio 2008*, ponencia 151. A Coruña. España.
- MORENO, E., ROMANA, M. y MARTINEZ, O. (2010). Comparación de capacidad y parámetros representativos entre el tramo en carril-bus de la línea 27 (EMT, Madrid-España) y sistema trolebús (Mérida-Venezuela). *IX Congreso de Ingeniería de Transporte, 7-9 Julio 2010*, ponencia 63. Madrid. España.
- MORENO, E., ROMANA, M. y MARTINEZ, O. (2012). Bus dwell-time model at main urban route stops. A study case in Madrid-Spain. Paper presented in the 91st Annual Meeting. TRB. January 22-26. Washington D.C.
- TRB (1985 y 1994). *Highway Capacity Manual*. Special Report 209, National Research Council, Washington D.C.