



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

# Efecto del transporte público en autobús sobre la capacidad de intersecciones urbanas semáforizadas

<b>Apellidos, nombre</b>	Soriano Ferriol, Javier (jasofer@tra.upv.es)
<b>Departamento</b>	Departamento de Ingeniería e Infraestructura de los Transportes
<b>Centro</b>	Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Camino, Canales y Puertos



## 1 Resumen

Cuando los responsables de la Administración competente en materia de gestión del tráfico de una ciudad se plantean el **diseño de la planta viaria** de una calle o avenida, es decir, el reparto del espacio urbano entre las alineaciones de fachada para los distintos usos (aceras, alineación de alcorques, estacionamientos, carriles de circulación, medianas, carriles bici, etc.), se hace necesario realizar una prognosis del tráfico futuro en dicha vía y, teniendo en cuenta la capacidad de la calzada planificada, comprobar que el tráfico calculado circulará con fluidez.

Ahora bien, cuando la vía ya existe y se da una situación de congestión, cabe analizar todos los factores que influyen en la capacidad de la vía para actuar sobre aquellos que puedan mejorar la situación.

De ellos, la circulación y parada de los **autobuses de transporte público**, es uno de los que más repercute sobre la capacidad. Es por ello que, en las ciudades con problemas de congestión, una de las primeras medidas a tomar es hacer un análisis cuantitativo de sus efectos.

Así pues, a lo largo del artículo se analiza la formulación de la capacidad de una calle con intersecciones semaforizadas según el "Highway Capacity Manual 6.0" de 2016 (publicado por el "Transportation Research Board" de Washington D.C.), el cual, en sus capítulos 19 y 29 a 31, establece los factores que influyen en dicha capacidad.

Seguidamente, se estudia para una avenida genérica tanto el factor por vehículos pesados y pendiente como el factor de bloqueo por buses que se detienen en parada, cuantificándose su efecto sobre la capacidad.

Finalmente, se identifican las posibles medidas a adoptar para mejorar o incluso resolver una congestión de tráfico.

## 2 Objetivos

El objetivo principal del presente artículo es identificar, en un caso de congestión en una calle o avenida de una ciudad, qué medidas respecto al transporte público en autobús existente se pueden adoptar. Para ello, se cuantificará el efecto de los factores reductores de la capacidad a causa tanto de la circulación de los autobuses como de su parada, de manera que al aplicarlo para el caso genérico, luego pueda resolverse un caso particular.

También se pretende capacitar para aplicarlo en futuras concepciones de diseños geométricos de viales urbanos.

## 3 Introducción

Es frecuente que cuando circulamos por un carril de una avenida de una ciudad y vamos pasando los semáforos en verde, de repente nos encontramos con que el autobús de delante active el intermitente para hacer una parada y se detenga.



Además de la crispación que genera en toda la fila de vehículos detenidos, ya que ven cómo se pondrá irremediablemente el semáforo en rojo, también se generan frecuentes situaciones de peligro cuando tratan de cambiar de carril de cualquier manera para continuar la marcha.

¿A quién no le ha ocurrido esto alguna vez?

Lo primero que se suele plantear es reservar uno de los carriles (si hay más de uno, claro está) al bus, lo que suele tener un doble efecto:

1º- por un lado, se elimina su afcción a la circulación del resto de los vehículos, mejorando, a su vez, la fluidez de los autobuses

2º- pero por otro, se reduce la capacidad de la vía al contar con menos carriles para la circulación del resto de los vehículos

Debido a ello, ¿no cabría preguntarse hasta qué punto es una medida eficaz?

Porque si la vía ya está bastante saturada, la reducción de un carril podría provocar un atasco que afectará, inevitablemente, a los movimientos de vías transversales que, a su vez, bloquearían los cruces y repercutiría en el carril bus.

En aras de la movilidad sostenible, procede fomentar y proteger el transporte público, aun a costa del privado si fuese necesario y, de hecho, muchas ciudades proceden a limitar la circulación en sus viales más céntricos. Incluso se reservan totalmente para el transporte público obligando al resto del tráfico a desviarse por otras calles. Pero...

¿Hay otras soluciones intermedias?

Porque no hay que olvidar que unas veces somos usuarios del transporte público o deseamos una ciudad menos contaminada y más amable con el peatón, pero otras somos conductores, deseosos de una fluidez en la circulación.

Pasaremos a identificar y evaluar las medidas a adoptar en una situación como la planteada aquí, y a cuantificar sus efectos.

## 4 Desarrollo

Como quiera que los conceptos que se manejan son sencillos y de sentido común, y que la formulación empleada es bastante simple, no resulta necesario un estudio previo significativo para seguir el hilo de lo que se va a exponer.

Se suponen conocidos unas nociones básicas sobre las magnitudes utilizadas en la Ingeniería de Tráfico, tales como velocidad, intensidad, composición, separación, intervalo o densidad del tráfico. También es necesario conocer los conceptos de ciclo semafórico y fases en una intersección semaforizada.

A partir de esos conceptos, empezaremos definiendo la capacidad de una vía urbana y viendo cómo se obtienen tanto el factor por vehículos pesados y pendiente como el de bloqueo por buses que hacen parada.

A continuación analizaremos los parámetros de los que dependen y simularemos diversas situaciones para ver cómo afectan a la capacidad.



Finalmente lo aplicaremos para un ejemplo genérico cuantificando las mejoras, tras lo cual se estará en disposición de identificar las medidas necesarias a adoptar.

Comenzamos definiendo **capacidad** como el máximo número de vehículos que pueden atravesar una sección dada de vía durante un período de quince minutos, en unas condiciones determinadas de la vía y del tráfico, expresada en [vehículos / hora]. Se calcula para cada grupo de carriles.

Un **grupo de carriles** es cada conjunto de uno o más carriles que permiten el mismo movimiento. Así, un grupo sería el que obliga el giro a izquierda; otro, el que permita elegir entre seguir al frente o girar a la izquierda; otro, el que obliga a seguir al frente; otro el que permita elegir entre seguir al frente o girar a la derecha, y otro, el que sólo permite girar a la derecha. También puede ocurrir que en calles de un único carril se dé uno, dos o los tres movimientos simultáneamente.

Como la casuística en las ciudades es variada, lo primero a hacer cuando nos planteamos resolver un problema de congestión es realizar un estudio de campo determinando la señalización horizontal en los carriles, el sentido de circulación en las bocacalles, el tipo de estacionamiento en ambos lados de la calle, etc.

Según el Manual, la **capacidad de un grupo de carriles** viene determinada por la fórmula 1:

$$c_i = N \cdot s_i \cdot g_i / C$$

*Fórmula 1*

donde:

$c_i$  = capacidad del grupo de carriles  $i$  [veh / h]

$N$  = número de carriles del grupo de carriles  $i$

$s_i$  = intensidad de saturación de un carril [veh / h · carril]

$g_i / C$  = tiempo de verde para el grupo de carriles  $i$  / duración del ciclo [ s ]

De esta fórmula deducimos que si ya hemos maximizado la duración de la fase verde semafórica y nuestra demanda o intensidad de tráfico sigue superando la capacidad, hemos de actuar sobre la intensidad de saturación.

La **intensidad de saturación de un carril** viene fijada mediante la fórmula 2:

$$S_i = s_o \cdot F_w \cdot F_{HVg} \cdot F_p \cdot F_{bb} \cdot F_a \cdot F_{LU} \cdot F_{LT} \cdot F_{RT} \cdot F_{Lpb} \cdot F_{Rpb} \cdot F_{wz} \cdot F_{ms} \cdot F_{sp}$$

*Fórmula 2*

donde:

- $s_o$  = intensidad de saturación de base = **1900 veh / h · carril**
- $F_w$  = factor de ajuste por anchura de carril
- $F_{HVg}$  = factor por vehículos pesados y pendiente
- $F_p$  = factor por existencia de carril de estacionamiento y sus maniobras



- $F_{bb}$  = factor por bloqueo por buses que se detienen en la zona
- $F_a$  = factor por tipo de zona
- $F_{LU}$  = factor por uso de los carriles
- $F_{LT}$  = factor por giros a izquierda
- $F_{RT}$  = factor por giros a derecha
- $F_{Lpb}$  = ajuste en los giros a izquierda por cruce de peatones y bicicletas
- $F_{Rpb}$  = ajuste en los giros a derecha por cruce de peatones y bicicletas
- $F_{wz}$  = factor por obras en la vía
- $F_{ms}$  = factor por carril cerrado aguas abajo
- $F_{sp}$  = factor por atascos continuos aguas abajo

Así, cuando decimos que una avenida está "congestionada", puede que lo estén sólo unos grupos de carriles mientras otros funcionan, en teoría, correctamente. Luego, resulta no ser del todo cierto porque los conductores cambian de carril según se van colapsando los que utilizan... ¡si pueden! Pero si el tráfico es lo bastante denso, eso no es posible sin comprometer la seguridad vial.

Normalmente, los carriles más problemáticos son los de la derecha e izquierda, a los que no sólo les afectan los factores comunes a todos los carriles (anchura de carril, vehículos pesados y pendiente, tipo de zona, uso de carriles y obras o atascos), sino también los factores de giro (con o sin paso de peatones y/o bicicletas en la bocacalle), de paradas de transporte público (normalmente en el derecho) y el de estacionamiento.

En las fórmulas 3 y 4 se obtiene el **factor por vehículos pesados y pendiente:**

-para pendiente negativa

$$F_{HVg} = [ 100 - 0'79 * P_{HV} - 2'07 * P_g ] / 100 \quad \text{Fórmula 3}$$

-para pendiente positiva

$$F_{HVg} = [ 100 - 0'78 * P_{HV} - 0'31 * P_g^2 ] / 100 \quad \text{Fórmula 4}$$

donde:

$P_{HV}$  = porcentaje de vehículos pesados en el grupo de carriles

$P_g$  = pendiente de aproximación al cruce

Y en la fórmula 5 se obtiene el **factor por bloqueo por buses que se detienen:**

$$F_{bb} = [ N - (14'4 * N_B / 3600) ] / N \quad \text{Fórmula 5}$$

donde:

$N$  = número de carriles en el grupo de carriles



$N_b$  = número de buses parando por hora en 75 m antes o después del cruce semafórico, y con límite de 250

Y siendo al menos:  $F_{bb} \geq 0'05$

Pasemos a analizar estas fórmulas.

En cuanto al factor por vehículos pesados y pendiente, como la pendiente está fijada por las condiciones orográficas y urbanísticas, sólo depende del porcentaje de vehículos pesados, que en ciudades con limitación de circulación a los mismos, viene a reducirse casi a los autobuses.

Respecto al factor por bloqueo del bus, depende, además del número de carriles del grupo de carriles (parámetro sobre el que normalmente no podemos actuar), del número de detenciones en parada por hora en la zona próxima al cruce semafórico.

Si llegamos a  $N_b = 250$  maniobras / hora con un solo carril en el grupo, el factor saldría nulo y anularía la intensidad de saturación y, por tanto, la capacidad. Como en la realidad no se llega a anular totalmente, el Manual establece el valor mínimo de  $F_{bb} = 0'05$ . Para dos carriles en el grupo saldría  $F_{bb} = 0'5$ , lo que equivale a que el carril donde se detienen "no cuenta" para el resto del tráfico, y no afectaría al resto si lo convirtiésemos en un carril reservado para el bus.

Por otro lado, nos puede llamar la atención que lo que afecta a la capacidad son sólo los 75 m más próximos al semáforo. Esto es así porque a más distancia los carriles se comportarían como si tuviesen circulación continua no interrumpida por el mismo, y a la fórmula 1 no se le aplicaría el último factor de "proporción efectiva de verde".

## **Identificación de las medidas a adoptar**

Ahora es cuando nos hacemos la pregunta al encontrarnos con una calle o avenida congestionada en la que circulen autobuses de transporte público con parada en los 75 m antes o después del cruce semaforizado:

### **¿cómo podemos actuar respecto al transporte público en bus?**

En principio, podemos hacerlo **de dos maneras**:

- 1- aumentando los factores  $F_{HVg}$  y  $F_{bb}$
- 2- haciéndolos inaplicables

Antes que nada, y respecto a la primera, cabría plantearse si es posible llevar algunas líneas por otros viales alternativos sin menguar el servicio público; es decir, sirviendo los mismos orígenes / destinos de la ciudad. Con ello, por un lado aumentaría el factor  $F_{HVg}$  al reducirse el porcentaje de vehículos pesados  $P_{HV}$  respecto al tráfico total del grupo de carriles. Por otro, se reduciría el número de buses que se detienen (parámetro  $N_b$ ) y aumentaría el factor  $F_{bb}$  y, por tanto, la capacidad.

El problema es que se penaliza un posible transbordo entre líneas, y caso de no resultar posible o conveniente, debemos pasar a la otra actuación.



Respecto a la segunda, se pueden adoptar dos medidas:

-separar la circulación de los buses respecto al resto del tráfico mediante un carril exclusivo para los mismos. Esto resuelve la afección tanto de la circulación como de las paradas del bus al resto de grupos de carriles, pero reduce la capacidad total de la vía, pudiendo agravar el problema de congestión.

-desplazar la parada a la anterior o a la siguiente manzana, en cuyo caso, lo único que hacemos es "trasladar" el problema a otro sitio. Evidentemente, esto solo procedería si las condiciones de esa otra intersección semafórica son más favorables, por no tener giros a derecha o aparcamiento permitido, contar con más carriles o con menos tráfico.

## **Cuantificación de las medidas a adoptar**

Considerando que el resto de factores vienen fijados, y que solo vamos a actuar sobre el transporte público en bus, lo primero es ver un orden de magnitud de la afección sobre la capacidad del carril por el que circulan.

La mayoría de los cruces semaforizados dan entre un 30 y un 70% del tiempo a la fase verde (es decir,  $g/C = 0'3 - 0'7$ ), según sea vía principal o secundaria. Por otro lado, las frecuencias de paso de una línea de bus urbana suelen oscilar entre 3 y 15 minutos según sea la demanda de pasajeros. Por término medio se pueden considerar unos 8 - 10 bus/hora.

En calles secundarias con un solo carril, poco se puede hacer, pero el volumen de tráfico no suele superar los 300 o 500 vehículos/hora y no suelen pasar más de una o dos líneas de bus, con lo que  $F_{HVg}$  y  $F_{bb}$  serían 0'96 y 0'94 para una ciudad llana como Valencia. O sea, que el bus reduce la capacidad de la vía un **4%** y un **6%** respectivamente por ambos efectos. En dichos viales no suele haber problemas de congestión por lo que el efecto del bus es irrelevante en cuanto a la capacidad. No así en la demora causada en los coches cada vez que hacen una parada, empeorando el nivel de servicio de la vía.

Ahora bien, en avenidas de la red viaria principal, donde hay varios carriles con mucho volumen de tráfico y pueden circular hasta 10 líneas o más de buses urbanos, la situación cambia.

En la siguiente tabla 1 vemos los valores que adopta el factor  $F_{HVg}$  en función del número de carriles y de buses/hora en una ciudad llana como Valencia.

Cabe considerar que en situaciones próximas a la congestión y con fase verde la mitad del ciclo, difícilmente se superan los 700 vehículos/h/carril. Además, debe estudiarse si se trata de un carril con giro permitido (y por tanto un grupo de carriles con solo  $N = 1$ ) o sin giro (con lo cual forma parte de un grupo de varios carriles al frente, siendo  $N$  mayor o igual a 1). Acudiendo a la fórmula 3 con dicho valor, obtendríamos:



### Valor $F_{HVg}$

<b>N</b>	<b>10 bus/h (1 línea)</b>	<b>40 bus/h (4 líneas)</b>	<b>70 bus/h (7 líneas)</b>	<b>100 bus/h (10 líneas)</b>
1	0,989	0,955	<b>0,921</b>	<b>0,887</b>
2	0,994	0,977	<b>0,961</b>	<b>0,944</b>
3	0,996	0,985	0,974	0,962
4	0,997	0,989	0,980	0,972

Tabla 1

A continuación, en la tabla 2 vemos los valores que adopta el factor  $F_{bb}$  aplicando la fórmula 5:

### Valor $F_{bb}$

<b>N</b>	<b>10 bus/h (1 línea)</b>	<b>40 bus/h (4 líneas)</b>	<b>70 bus/h (7 líneas)</b>	<b>100 bus/h (10 líneas)</b>
1	0,96	0,84	<b>0,72</b>	<b>0,60</b>
2	0,98	0,92	<b>0,86</b>	<b>0,80</b>
3	0,99	0,95	0,91	0,87
4	0,99	0,96	0,93	0,90

Tabla 2

Antes que nada, indicar que son infrecuentes situaciones como las marcadas en rojo, con muchas líneas por calles de uno o dos carriles. Asimismo cabe destacar que a más carriles, mayores factores y, por tanto, menor afección a la intensidad de saturación  $S_i$ ; pero, ese menor porcentaje de afección lo hace a más cantidad de carriles y el efecto sobre la capacidad total de la sección de calle viene a ser el mismo.

Por otro lado, observamos que, sin considerar los valores en rojo, se puede llegar a disminuir la capacidad en un 4 y un 16 % respectivamente. O sea, que según sea el número de carriles y la cantidad de líneas, el transporte público puede llegar a afectar hasta un 20% en la capacidad de la vía.

Sin embargo, el hecho de crear un carril bus para suprimir el efecto de estos factores (además de mejorar la fluidez del mismo), conlleva la reducción de la capacidad en la misma proporción que se reducen carriles al resto del tráfico. Es, decir, si pasamos de 4 a 3 carriles, perdemos un 25% de capacidad, y si pasamos de 3 a 2 perdemos un 33%. Por tanto, hasta se agrava el problema de la congestión. Es decir, la creación de un carril reservado al bus SIEMPRE empeora situaciones próximas a la congestión, y sólo beneficia al transporte público...¡en teoría!, porque, como se





dijo antes, si los vehículos que se incorporan desde vías laterales se encuentran la vía colapsada y se quedan atravesados, también se acaba bloqueando a esos carriles bus.

Además, debe tenerse en cuenta que con variaciones de tráfico de un 2-3 % anual como venían dándose antes de la crisis del Covid-19, este tipo de medidas sólo consiguen aplazar unos pocos años otro tipo de actuaciones más contundentes, como la reserva total de la vía para el transporte público, la carga-descarga o el acceso de vecinos y vehículos de emergencia.

Vamos a analizarlo con un ejemplo para comprender bien todo lo expuesto.

### **Ejemplo práctico de aplicación**

*Avenida de 3 carriles (Paseo de la Alameda en Valencia), con parada de transporte público en bus cerca de la intersección semaforizada, en la que paran 7 líneas con frecuencias de 7-8 minutos en hora punta. Se sabe que en ciertas horas se congestiona. ¿Qué medidas se pueden tomar respecto al bus, y cómo afectarían a la capacidad del resto del tráfico? ¿Son útiles? (ver figura 1)*



Figura 1

#### Solución:

*De las tablas 1 y 2, para 3 carriles y 7 líneas de bus, se obtiene que el factor  $F_{HVg}$  es 0.974 y el factor  $F_{bb}$  es 0'91. Es decir, el hecho de pasar los buses por ahí resta casi un 3% de capacidad, y por hacer parada cerca del semáforo, otro 9%.*



Podemos adoptar las siguientes medidas sin alterar la sección transversal de la vía:

- 1- Pasar las líneas de transporte público por la vía lateral de servicio de la Alameda, con lo que ganamos ese 12% de capacidad en la vía central de la avenida.
- 2- Retrasar la parada alejándola unos 75 m del semáforo, ganando un 9% de capacidad.
- 3- Señalizar el carril derecho como reservado a EMT-Taxi. Con ello, por un lado mejoramos la capacidad el 12% de los factores indicados, pero se pierde un 33% al perder uno de los 3 carriles para el tráfico general. En definitiva, se pierde en torno al 20% de capacidad y habrá más atascos.

Dependiendo del porcentaje de capacidad que nos falte para evitar el colapso, se podría adoptar la medida 2. La medida 1 valdría si la vía de servicio no está muy cargada también y sus tiempos de verde en semáforos no fuesen peor que los de la vía central para no perjudicar el servicio público. La medida 3, desde luego, aunque beneficia al bus, perjudica seriamente al resto de tráfico.

Ahora bien, cada caso tiene sus "condiciones de contorno". Y, en este ejemplo, si no conviene pasar las líneas de bus por la vía de servicio, se podría mejorar la capacidad creando un tramo de carril EMT-Taxi a costa bien del aparcamiento derecho en unos 60 o 70 m, o bien en la mediana. Con ello se mantendrían los 3 carriles de circulación general y sin buses, que ya dispondrían del suyo propio. Esta alternativa mejoraría la capacidad en un 12% y protegería el bus con un carril propio.

## 5 Cierre

A lo largo de este objeto de aprendizaje hemos aprendido a analizar una intersección semaforizada con problemas de congestión, identificando las medidas a adoptar respecto al paso y parada de los buses de transporte público en la vía, a fin de su resolución.

Se ha desarrollado un ejemplo típico cuantificando las medidas posibles a adoptar al respecto, a fin de comprobar que, en función de la saturación del cruce, se identifica un limitado abanico de posibilidades de actuación.

Evidentemente, modificar la sección transversal de la vía (como se ha visto en el ejemplo práctico), o actuar sobre otros factores que afectan a la capacidad de una vía, también ofrecen soluciones cuantificables, pero no eran el objeto del presente artículo.

## 6 Bibliografía

### 6.1 Manuales:

-Transportation Research Board - "Highway Capacity Manual 6.0" Washington D.C.