

# Un Modelo del Tiempo de Espera de Viajeros en Paradas de Autobuses considerando el tráfico en la ciudad

Ángel VEGA ZAMANILLO<sup>(1)\*</sup>  
Ángel IBEAS PORTILLA<sup>(2)\*</sup>  
Luigi DELL'OLIO<sup>(3)\*</sup>  
Hernán GONZALO ORDEN<sup>(4)\*\*</sup>

(\*) Departamento de Transportes y Tecnología de Proyectos y Procesos. Universidad de Cantabria. (\*\*) Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Burgos

**RESUMEN:** Desde 1.955 se han formulado modelos microeconómicos que optimizan la frecuencia y número de autobuses en un sistema de transporte público urbano. En estos modelos, el tiempo de espera en las paradas es función de la frecuencia o intervalo de los autobuses, de la demanda de los usuarios y la ocupación de los autobuses. En el presente artículo se exponen diferentes modelos y se estudia un modelo matemático del tiempo de espera en las paradas considerando el tráfico de vehículos privados de la red viaria por donde circulan los autobuses. Así, el tiempo de espera se ha analizado mediante un modelo de regresión con formulación sencilla y con variables exclusivas de tráfico, a partir del intervalo teórico que existe en las líneas de autobuses y del tráfico existente en la red viaria. Además, se añade un ejemplo práctico en una ciudad de España de tamaño medio, obteniendo unos valores de los coeficientes del modelo matemático. Este modelo permitirá obtener los tiempos de espera y los retrasos de las llegadas de los autobuses a las sucesivas paradas de las líneas existentes, con la ventaja de utilizar únicamente variables de tráfico que se pueden obtener en breves intervalos de tiempo, de tal forma que en función del flujo de vehículos existente se puede regular el movimiento de los autobuses desde un centro de control y planificación del transporte público.

## INTRODUCCIÓN

En un principio, los costes del transporte relevantes eran únicamente los costes de operación de los vehículos, hasta que se añadieron los costes temporales de los usuarios. Ya que la realización de un viaje responde a diferentes motivos, la valoración de los tiempos de viaje difiere según cual sea el motivo. Tienen una clara significación los

viajes laborales, no solo los desarrollados por los conductores de transporte público, mercancías o taxistas, sino los que tienen por objeto el acceso al trabajo y regresar del lugar de trabajo, siendo éste el motivo de viaje más numeroso.

En el análisis microeconómico del transporte público urbano hay dos tipos de costes que forman el coste total de un sistema transporte público colectivo urbano en superficie. Los costes del usuario y los costes de operación de los autobuses.

Los costes del usuario están representados por el coste de los diferentes tiempos de viaje. Los tiempos de viaje del usuario son el desplazamiento desde su origen (hogar, lugar

<sup>(1)</sup> Profesor de Caminos.

<sup>(2)</sup> Profesor Titular de Transportes.

<sup>(3)</sup> Investigador de Transportes.

<sup>(4)</sup> Profesor de Transportes.

## Cuadro I

## VALORACIÓN DEL TIEMPO EN DIFERENTES ETAPAS DEL VIAJE

| Autor     | Valor tiempo en autobús | Valor tiempo de acceso a pie | Valor tiempo de espera |
|-----------|-------------------------|------------------------------|------------------------|
| Rogers    | 1,0                     | 2,4                          | 1,7                    |
| Costinett | 1,0                     | 1,7                          | 2,3                    |
| Davies    | 1,0                     | 2,5                          | 3,2                    |
| Steele    | 1,0                     | 2,8                          | 2,1                    |
| Hensher   | 1,0                     | 1,7                          | 3,7                    |
| Madan     | 1,0                     | 1,3                          | 2,6                    |
| Matas     | 1,0                     | 1,1                          | 3,6                    |

Fuente: M.O.P.T.M.A., 1.994.

de trabajo, otra parada de transporte, etc.) hasta las paradas de los autobuses; el tiempo de espera en las paradas hasta que llega el autobús de la línea elegida; el tiempo de recorrido en el autobús desde la parada origen hasta la parada final; y el tiempo que tarda el viajero desde la parada final a su lugar de destino. Los costes del operador están formados por la puesta en funcionamiento de los autobuses, su amortización, conductores, gasolina, ruedas, costes indirectos, etc.

En otros modelos de costes de un sistema de transporte público más recientes se añade el coste del nivel de servicio de los autobuses, bien como un sumando más a los dos costes anteriores, o incluyendo otras variables como la demanda y la ocupación de los autobuses (Vega, A et al. 2.002 y Merino, E et al. 1.998). De hecho, el «*Highway Capacity Manual*» analiza el nivel de servicio del transporte público con un sistema bidimensional en donde se combina el estado de la ocupación de los autobuses y la frecuencia de los mismos.

Sin embargo, los modelos existentes no incluyen variables fundamentales del estado del tráfico como el flujo o la densidad de vehículos. En la mayoría de los modelos se refleja un estado teórico del tráfico en ámbito urbano a partir de la velocidad comercial de los autobuses. El uso compartido de la red urbana entre autobuses y vehículos privados da lugar a una interacción del tráfico que afecta a la velocidad de autobuses y que incide sobre el nivel de congestión de la red viaria urbana. A partir de volúmenes significativos, esta interacción del tráfico

provoca un aumento de la densidad y flujo de vehículos, de forma que se produce una reducción de la velocidad de todos los vehículos, tanto de uso público como de uso privado.

En una arteria concreta se puede degradar el nivel de servicio por factores tales como un inadecuado ciclo semafórico, una coordinación deficiente entre semáforos, un incremento de la circulación, etc. De hecho el «*Highway Capacity Manual*» calcula la capacidad de los autobuses pertenecientes a una línea de transporte urbano considerando el efecto de los semáforos dentro de la ciudad, incluyendo la proporción de verde en las intersecciones semafóricas como la relación entre el tiempo de verde efectivo ( $g$ ) y la duración del ciclo ( $C$ ) de los semáforos en el sentido de avance de los autobuses.

En esta investigación, se han analizado diferentes datos de tiempos de espera que tienen los usuarios de autobuses en ámbito urbano, que permiten ser relacionados con los intervalos de los autobuses que posibilitan realizar el viaje, y con el tiempo de recorrido de los autobuses desde la cabecera de la línea hasta la parada donde esperan los viajeros, dependiendo de las características de la viaria urbana y el flujo de vehículos.

#### MODELOS DEL TIEMPO DE ESPERA Y RECORRIDO DE VIAJEROS EN PARADAS DE AUTOBUSES CONSIDERANDO EL TRÁFICO DE LA CIUDAD

De las diferentes etapas del tiempo de viaje del usuario del transporte público urbano, el tiempo de espera en las paradas es el más valorado. Con el transcurso del tiempo se han ampliado formulaciones y modelos del tiempo de espera para los usuarios del transporte público.

Con respecto al tiempo de espera, Byrne, B. F. (1.976) lo calcula en función del intervalo entre autobuses consecutivos de una misma línea ( $h_i$ ), con una constante ( $c$ ) de valor entre cero y uno, y un valor unitario del tiempo de espera ( $\gamma_w$ ).

$$t_w = ch \quad (1)$$

Mohring (1.976) acepta el tiempo medio de espera en las paradas como la mitad del

intervalo entre autobuses de una misma línea, asumiendo que dicho intervalo ( $h$ ) es inversamente proporcional a la frecuencia ( $f$ ) de los mismos.

$$t_w = \frac{1}{2f} \quad (2)$$

En este caso al optimizar la función de costes del sistema de transporte público se obtiene una frecuencia de autobuses proporcional a la raíz cuadrada de la demanda del servicio (Jara Díaz, S. R. et al., 2.003).

Chriqui y Robillard (1.975), y posteriormente De Cea y Fernández (1.993), analizan un modelo de asignación de viajes al transporte público incluido dentro del equilibrio simultáneo entre la red vial de transporte privado y la red de transporte público. En esta caso se analiza el coste del transporte, incluyendo el tiempo de espera y el tiempo de recorrido en el autobús, para cada arco que forma la trama urbana. Para ello, se plantea seleccionar aquellas líneas comunes y atractivas para el usuario que posibilitan realizar un viaje, debido a que la suma de los tiempos de espera y tiempos de recorrido en el autobús son mínimos. Estos autores estudian el tiempo de espera considerando la densidad de líneas desde un mismo origen a un destino final. Siendo ( $f_i$ ) la frecuencia de los autobuses, ( $x_i$ ) un valor que puede ser 1 ó 0 si la línea es atractiva para el usuario, ( $k$ ) un valor entre 0 y 1 que indica una proporción del intervalo y se obtiene a partir de observaciones en campo, y ( $n$ ) el número total de líneas que unen un origen y destino, el tiempo de espera es:

$$t_w = \frac{k}{\sum_{i=1}^n (f_i x_i)} \quad (3)$$

$$x_i = \{0,1\}$$

El modelo de Jansson (Jara Díaz, S. R. et al., 2.003) indica que el tiempo total de recorrido es función del tiempo en movimiento ( $t$ ) de los autobuses, la demanda de viajeros ( $Y$ ), la frecuencia de autobuses ( $f$ ) y un tiempo de servicio ( $T$ ) mientras los pasajeros suben y bajan en las paradas de autobús.

$$t_c = t \frac{Y}{f} + T \quad (4)$$

Si la frecuencia en una línea de transporte está dada por la relación entre el número de autobuses ( $B$ ) y el tiempo total de recorrido ( $t_c$ ), se puede obtener otra expresión del tiempo de espera

$$B = fT + tY \quad (5)$$

$$t_w = \frac{T}{2(B - tY)} \quad (6)$$

Oldfield y Bly (Jara Díaz, S. R. et al., 2.003) proponen diferentes tipos de modelos en el tiempo de espera en las paradas de autobuses, con el objetivo de determinar el tamaño y número óptimo de autobuses considerando la congestión de pasajeros y haciendo el tiempo de espera dependiente de la ocupación de los vehículos. La ocupación de los autobuses es  $\phi$ , mientras que  $\varepsilon$ ,  $z$  y  $\gamma$  son parámetros

$$t_w = \frac{\varepsilon}{f} (1 - z\phi^\gamma)^{-1} \quad (7)$$

$$t_w = \frac{\varepsilon}{f} + z\phi^\gamma \quad (8)$$

De Cea, J. (1.998) compatibiliza los costes de los diferentes tiempos, representándolos en un modelo mediante funciones de tipo BPR. Los costes de acceso y de transbordo se suponen constantes, en tanto que los asociados a los arcos de transporte público son costes generalizados de los viajes (tarifa, tiempo de viaje en autobús, tiempo de espera,...).

$$c_s = c_s + \frac{\alpha}{f} + \beta \left( \frac{Ks + Ks}{Ks} \right) \quad (9)$$

En la expresión anterior, ( $c_s'$ ) representa el tiempo de viaje en el autobús más la tarifa, ( $f_s$ ) es la frecuencia combinada de las líneas de transporte público que sirven en el arco ( $s$ ), ( $V_s$ ) es el flujo de pasajeros que viaja entre los nodos inicial y final del arco ( $s$ ) en alguna de sus líneas, ( $V_s'$ ) es el flujo de compite con ( $V_s$ ) por la capacidad de las líneas de ( $s$ ), y ( $K_s$ ) es la capacidad total ofertada por las líneas del arco ( $s$ ). Los parámetros de calibración son  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $n$ . El segundo término de la ecuación representa el tiempo de espera en flujo libre del servicio ofrecido en el arco

(s), en tanto que el tercer sumando representa el tiempo de espera en congestión, es decir, el aumento del tiempo de espera sobre el flujo libre, en función del flujo de pasajeros, debido a la existencia de una capacidad limitada de pasajeros.

Robusté, F. y Merino, E. (1.998), calculan un modelo parecido al anterior considerando toda la demanda de transporte del día, donde el tiempo de espera es función del intervalo entre autobuses. Su objetivo es optimizar la frecuencia entre autobuses y la separación entre las diferentes líneas dentro de un área de estudio, suponiendo trayectorias de los vehículos paralelas. En este caso, también la frecuencia de los autobuses es proporcional a la raíz cuadrada de la demanda.

En una parada simple, De Cea, J. (1.998), considera el tiempo de espera ( $t_w$ ) y el tiempo libre de espera a flujo libre ( $t_0$ ) de la siguiente manera:

$$t_w = t_0 + \beta\phi^n \quad (10)$$

$$\phi = \frac{\lambda + (K_t - K_f)\mu}{K_f\mu}$$

El término ( $\phi$ ) representa el tiempo de espera añadido por la congestión de usuarios en la parada, donde ( $K_t$ ) la capacidad total de pasajeros de cada vehículo, ( $K_f$ ) la capacidad libre de pasajeros de cada vehículo, ( $\mu$ ) es la tasa de llegada de la línea que llega a la parada, en autobuses por hora, y ( $\lambda$ ) es la tasa de llegada de personas a la parada con unidades de pasajeros por hora.

Analizando el tiempo de espera de los pasajeros, Daganzo, C. F. (2.000) considera una tasa de llegada de pasajeros a las paradas ( $l$ ) constante. El tiempo total de espera durante un periodo de tiempo ( $T$ ), medido como suma continua de intervalos ( $h_k$ ) entre autobuses será:

$$W(T) = \sum_{k=1}^K \frac{1}{2} (\lambda h_k^2) \quad (11)$$

En esta expresión se puede considerar el número total de pasajeros servidos ( $N$ ):

$$N(T) = \sum_{k=1}^K \lambda h_k \quad (12)$$

$$T = \sum_{k=1}^K h_k$$

Combinando ambas expresiones, se llega a la conclusión que el tiempo medio de viaje es independiente de la tasa de llegada de pasajeros:

$$\bar{w} = \frac{W(T)}{N(T)} = \frac{1}{2} \frac{\sum_{k=1}^K h_k^2}{\sum_{k=1}^K h_k} \quad (13)$$

Gendreu, M. (2.001) propone un modelo de tiempo de espera considerando la congestión del sistema a partir de variables como el flujo de pasajeros y la capacidad de las líneas. En este caso se parte de unas funciones de distribución del intervalo entre autobuses del tipo Earlang.

Vega et al. (2.002) definen tres tipos de costes dentro de un sistema de transporte público colectivo urbano. A los costes de operación y los costes temporales de los viajeros, se añade un coste de nivel de servicio del transporte, influenciado por el coste de viajar de pie y el coste de la densidad de viajar de pie dentro del autobús. Se propone que el tiempo de espera en las paradas estará comprendido por una fracción de tiempo de los intervalos de los autobuses pertenecientes a las líneas ( $l$ ) que posibilitan realizar el viaje desde la parada ( $i$ ) hasta la parada ( $j$ ). Puesto que puede existir la posibilidad que un viajero pueda disponer de varias líneas con recorridos comunes desde una parada ( $i$ ) hasta una parada ( $j$ ) se ha incorporado un coeficiente ( $k_{i,j}$ ) que representa la densidad de líneas con paradas y recorridos comunes.

$$t_{w,l,i,j} = \beta + \beta_h \left( \frac{1}{\sum_{l=1}^{n_l} \left( \frac{1}{h} \right)_l} \right) \quad (14)$$

$\forall l \in i,j$

$$t_{w,l,i,j} = \beta + \beta_h \left( \frac{1}{k_{i,j} \left( \frac{1}{h} \right)_l} \right)$$

Vega et al. (2.002) proponen que el tiempo de recorrido en el autobús es inversamente proporcional a la velocidad de recorrido ( $v_{r,t,l}$ ) de los tramos ( $t$ ) que forman la longitud ( $l_{t,l}$ )

por donde circulan los autobuses y por el número de paradas de cada una de las líneas (l). Para estudiar el efecto del tráfico en el movimiento de los autobuses, la velocidad de recorrido está influenciada por la velocidad libre de circulación ( $v_{0,t,l}$ ) y el flujo de vehículos ( $i_{t,l}$ ) en los tramos (t) de la red viaria urbana del recorrido de los autobuses de cada una de las líneas (l) existentes.

$$t_{c,l,i,j} = \alpha + \alpha_b * b_{l,i,j} + \alpha_v * \sum_{t=i}^{n_{t,j}} \left( \frac{l_{t,l}}{v_{r,t,l}} \right) \quad (15)$$

$$t_{c,l,i,j} = \alpha + \alpha_b * b_{l,i,j} + \alpha_v * \sum_{t=i}^{n_{t,j}} \left( \frac{l_{t,l}}{v_{0,t,l} - \alpha_0 * i_{t,l}^{\rho_0}} \right)$$

Jara Díaz, S. R. et al., (2003) continua con las investigaciones de Oldfield y Bly, y propone variar el precio del tiempo de recorrido en el autobús de forma lineal con la ocupación del mismo. Al optimizar el sistema de costes de transporte público se vuelven a obtener frecuencias proporcionales a la raíz cuadrada de la demanda, pero en este caso varía según el precio unitario del tiempo de viaje y la longitud media de recorrido de los viajeros existentes.

En los modelos expuestos anteriormente, se observa la dependencia del tiempo de espera de los viajeros en las paradas con respecto al intervalo de los autobuses, la demanda y la ocupación del autobús. La mayoría de los modelos del tiempo de espera recogen unos macroestados de la movilidad y asignación de viajes a la red de transporte público.

Sin embargo, la variación del intervalo debido a la velocidad de recorrido de los autobuses en los diferentes tramos de la red desde la cabecera hasta la parada de subida del usuario puede ser percibido por el viajero en momentos concretos y se debe a acontecimientos que se producen localmente dentro de la red viaria (atascos, aumento del flujo de vehículos, demoras en intersecciones, etc.). Esta percepción, que supone una variación en los costes del tiempo de espera y recorrido de los usuarios, no se observa en los modelos expuestos anteriormente, ya que las variables fundamentales del tráfico (velocidad, flujo y densidad de vehículos) no aparecen directamente en los modelos

comentados. Únicamente se puede percibir si hay una significativa variación en la frecuencia de los autobuses.

Si estas alteraciones del tráfico se producen muy a menudo, será conveniente analizar unos microestados del tráfico y una discretización de los tiempos de espera de los usuarios en diferentes momentos del día de forma que la empresa pueda estudiar y analizar los costes de operación del servicio y modificar la movilidad de los autobuses para reajustar los intervalos de cada una de las líneas.

Los efectos de las variaciones del tráfico con respecto los tiempos de espera de los usuarios, se pueden estudiar con modelos matemáticos sencillos en los cuales se incluyan directamente variables del tráfico, por ejemplo, el flujo de vehículos privados. Estos valores y datos se pueden obtener en determinados momentos del día a partir de los centros de control de tráfico de las ciudades mediante espiras y lazos electromagnéticos. Una vez incluidos estos datos en los modelos matemáticos, se pueden tomar decisiones y actuaciones rápidas que permiten tomar decisiones para optimizar el movimiento de los autobuses.

#### HIPÓTESIS DEL MODELO

Las hipótesis realizadas en el modelo presente del tiempo de espera de viajeros en paradas de autobuses pertenecientes al transporte público colectivo urbano considerando el tráfico de la ciudad son las siguientes:

- La forma de la ciudad y su red viaria no afecta a los resultados del modelo.
- El modelo se realiza para un periodo temporal de una hora, suponiendo que posee un mayor interés el correspondiente al periodo punta de mayor demanda de los autobuses, o el momento en que aparece un flujo elevado de vehículos en la red viaria de la ciudad que es compartida por el transporte público y privado.
- A pesar de existir un flujo elevado de vehículos, la circulación se mantendrá estable, con densidades de vehículos en las vías de circulación no superiores a sus densidades críticas.

- No existe interferencia entre las colas de los vehículos de dos intersecciones cercanas.
- Las longitudes del recorrido de los autobuses de las líneas de transporte colectivo existentes pueden ser diferentes entre sí pero se mantendrán constantes en el tiempo.
- Los viajeros pueden llegar aleatoriamente y con facilidad a las paradas de acceso a los autobuses.
- Los usuarios pueden utilizar diferentes líneas de autobuses, con diferentes intervalos, que les permitan realizar un mismo viaje desde una parada origen hasta una parada de destino.
- La demanda de viajeros en el transporte colectivo está uniformemente repartida en el periodo horario del estudio.
- Los flujos de vehículos que circulan por los tramos del recorrido de los autobuses se mantienen uniformemente repartidas en el periodo horario.
- Las velocidades de los vehículos y autobuses que circulan por los tramos del recorrido de los autobuses se mantienen constantes en el periodo horario.
- Los tiempos medios de recorrido de los tramos que forman la red viaria incluyen los tiempos medio de demora en las intersecciones existentes.
- Las condiciones de circulación son diferentes según los tramos viarios y sentidos de circulación posibles.
- Las velocidades de operación y comerciales son diferentes para cada línea de autobuses.
- En principio, los autobuses mantienen constante el intervalo de llegada en las paradas según la línea en la que prestan servicio.
- La frecuencia de los autobuses se mantiene constante en el periodo considerado para cada línea existente.
- No existe límite en el tamaño de la flota de autobuses.

#### MODELO DEL TIEMPO DE ESPERA EN PARADAS DE AUTOBÚS CONSIDERANDO EL TRÁFICO DE LA CIUDAD

El dimensionamiento de las líneas de autobús, con un número de autobuses

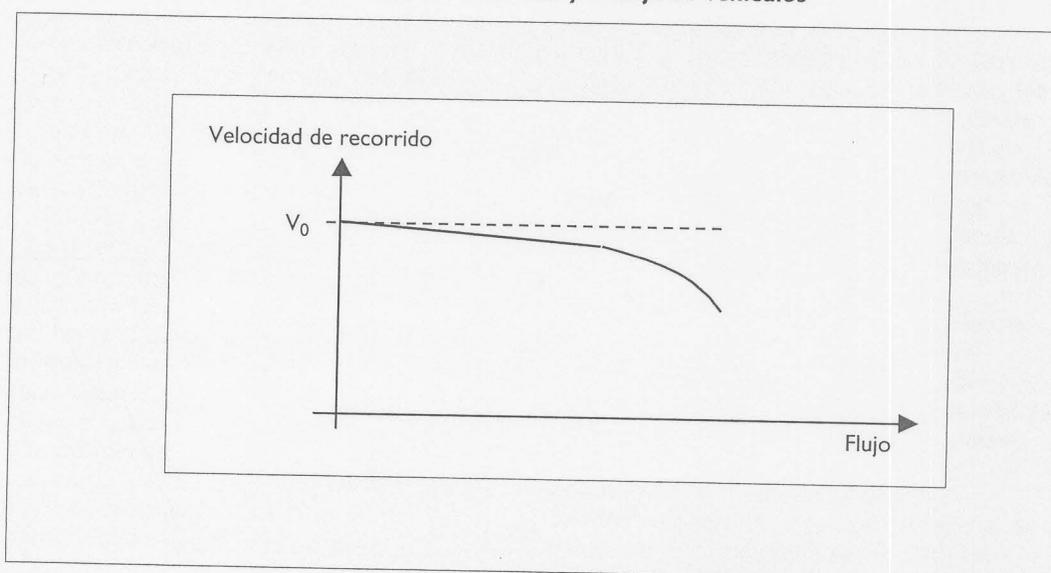
concreto y un intervalo determinado para unos condicionantes teóricos y regulares estimados por la empresa, se puede ver desajustado para unas condiciones reales existentes en la red viaria (Molinero Molinero, Á. R., 1.996). El tiempo de recorrido de los autobuses desde el comienzo del recorrido hasta las sucesivas paradas puede ser variable por diferentes motivos, como la variación del flujo y densidad de los vehículos en los diferentes tramos que forman la red viaria, aleatoriedad del aparcamiento urbano en superficie provocando reducciones en la velocidad de recorrido, estado de las plataformas de las vías de circulación, ubicación y facilidad de acceso a las paradas, número de calles transversales y giros permitidos en las intersecciones, etc.

Existen diferentes modelos deterministas, probabilísticas o heurísticos que permiten relacionar la velocidad de recorrido de una línea de autobuses ( $l$ ) en un tramo ( $t$ ) de red viaria con variables fundamentales del tráfico como el volumen y densidad de los vehículos. Un modelo existente permite relacionar la velocidad de recorrido ( $v_{r,t,l}$ ) con flujo de vehículos ( $i_{t,l}$ ) en el sentido de circulación del avance de los autobuses, de manera que en una circulación estable, al aumentar el flujo de vehículos disminuirá la velocidad de recorrido (Sánchez Blanco, V., 1.998). En esta expresión la velocidad máxima de recorrido es la velocidad libre ( $v_{0,t,l}$ ) de circulación cuando el flujo de vehículos tiende a cero dentro de unas condiciones adecuadas de la plataforma existente  $\alpha_0, \rho_0$  son parámetros de ajuste.

$$v_{r,t,l} = v_{0,t,l} - \alpha_0 * i_{t,l}^{\rho_0} \quad (16)$$

Estos modelos han sido aplicados en grandes ciudades, como por ejemplo en Londres, y resultan válidos dentro de una circulación continua o en una circulación urbana sin encontrarse en un estado de congestión. Es necesario recordar que unos deficientes niveles de servicio (E ó F) significa una circulación poco estable con intersecciones urbanas donde los autobuses tienen grandes demoras y la formulación continua del modelo resulta válida únicamente en un macroestado del tráfico. La continuidad del modelo anterior se ve rota

Figura 1. Relación entre la velocidad de recorrido y el flujo de vehículos



por las intersecciones con semáforos o señalizadas con indicaciones de stop y ceda el paso, dando lugar a unos tiempos de recorrido, incluyendo las demoras, muy altos. Aún así, y analizando los diferentes tramos de la red viaria, las curvas del modelo expuesto tienen una tangente muy pronunciada a partir de volúmenes de más de 800 ó 1.000 vehículos por hora y sentido de circulación, resultando unas velocidades de recorrido muy bajas como reflejo de la congestión que pueda existir.

Existen dos tipos de regulación de servicios de transporte público regular: por horarios, ajustando la hora exacta a la que tienen que pasar cada uno de los autobuses por cada una de las paradas de su recorrido, y por intervalos, es decir manteniendo siempre el mismo intervalo entre dos autobuses consecutivos de una línea al paso por cada parada. La regulación del servicio por intervalos suele ser el caso más usual en la mayoría de las ciudades.

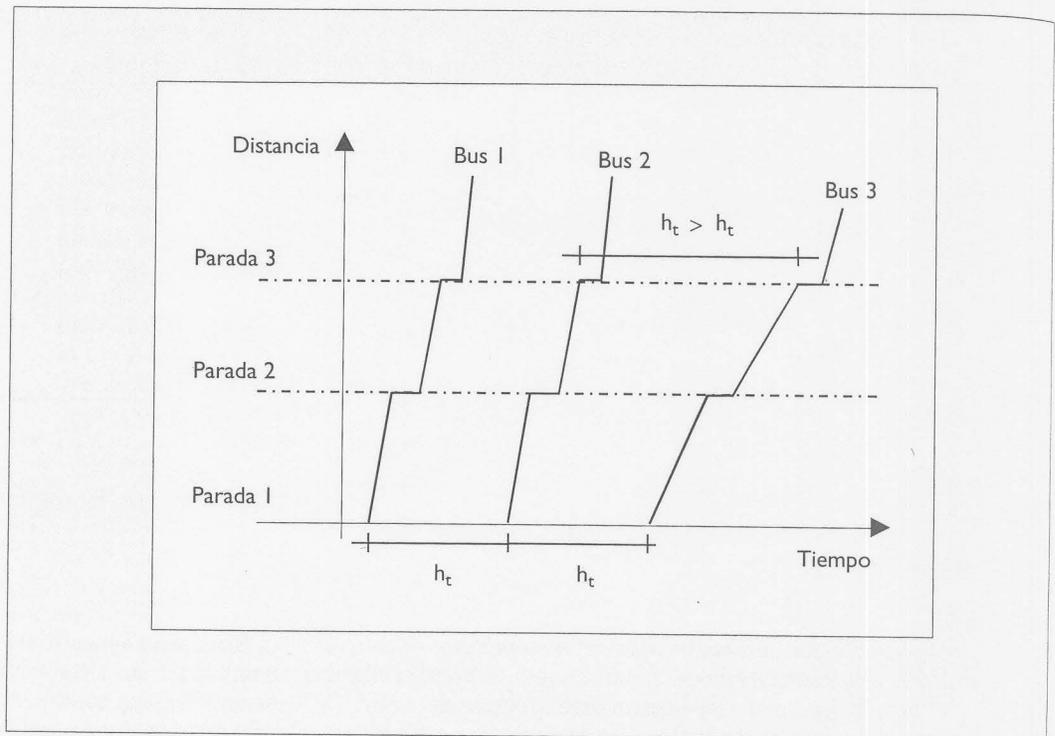
En el gráfico espacio-tiempo de las trayectorias de los autobuses se puede observar como al variar las velocidades de recorrido entre las paradas (representadas por las pendientes de las trayectorias) se puede obtener un intervalo real ( $h_r$ ) mayor que el intervalo teórico regular ( $h_t$ ) dando lugar a retrasos de llegada de autobuses a las paradas.

En el caso opuesto, si la trayectoria de un autobús tiende a ser vertical, el tiempo de recorrido disminuirá por que el flujo de vehículos es escaso, y el intervalo entre dos autobuses consecutivos tenderá a disminuir y por tanto, también disminuirá el tiempo de espera en las paradas, hasta que el flujo de vehículos vuelva a aumentar. Si esto ocurre a menudo, la empresa tendrá que analizar los costes de operación del servicio y modificar la movilidad de los autobuses para reajustar los intervalos de cada una de las líneas.

Otra variable importante que puede modificar el tiempo de espera es la densidad de líneas de autobuses que posibilitan realizar un viaje desde una parada origen hasta una parada final. Al aumentar la densidad de líneas, las posibilidades de elección aumentan, y por tanto es de esperar que el tiempo de espera disminuya.

Partiendo de las teorías expuestas anteriormente, el tiempo de espera en las paradas de transporte público ( $t_{w,i,j}$ ), estará comprendido por una fracción de tiempo del intervalo teórico ( $h$ ) de los autobuses pertenecientes a las líneas ( $l$ ) que posibilitan realizar el viaje desde la parada ( $i$ ) de subida hasta la parada de destino ( $j$ ), y por otra fracción del tiempo de recorrido desde la cabecera hasta la parada donde esperan los viajeros, dependiente de la longitud ( $l_{t,i}$ ) de los tramos ( $n_{t,i}$ ) del recorrido

Figura 2. Trayectoria de los autobuses pertenecientes a una misma línea de transporte



de la línea hasta llegar a la parada (i) y de la velocidad media de recorrido de los vehículos ( $v_{r,t,l}$ ) en los tramos de la red. Esta velocidad de recorrido depende de la velocidad libre en los tramos por donde pasa la línea ( $v_{0,t,l}$ ) y del flujo de vehículos totales ( $i_{t,l}$ ) en el sentido de avance de los autobuses y en cada tramo (t) desde la cabecera a la parada (i). El intervalo regular (h) depende de cada línea (l), y cada viajero puede tener la posibilidad de tener un número de líneas (nl) variable para realizar el viaje. En este caso  $\beta$ ,  $\beta_h$  y  $\beta_v$  son parámetros de ajuste del modelo de tiempo de espera. Además  $\alpha_0$  y  $\rho_0$  son parámetros de ajuste del modelo de tráfico.

$$t_{w,l,i,j} = \beta + \beta_h * \left( \frac{1}{\sum_{l=1}^{nl} \left( \frac{1}{h} \right)_l} \right) + \beta_v * \sum_{l=1}^{nl,i} \left( \frac{l_{t,l}}{v_{r,t,l}} \right) \quad (17)$$

$$t_{w,l,i,j} = \beta + \beta_h * \left( \frac{1}{\sum_{l=1}^{nl} \left( \frac{1}{h} \right)_l} \right) + \beta_v * \sum_{l=1}^{nl,i} \left( \frac{l_{t,l}}{v_{0,t,l} - \alpha_0 * i_{t,l}^{\rho_0}} \right)$$

#### APLICACIÓN DEL MODELO

Se ha realizado una puesta en práctica del modelo expuesto anteriormente sobre el transporte público colectivo de la ciudad de Santander (España). El Ayuntamiento de Santander tiene actualmente una población de 183.635 habitantes y una superficie de 33,9 kilómetros cuadrados, con una orografía montañosa y de forma alargada. La empresa que se encarga de la explotación del transporte público en Santander es Servicio Municipal Transporte Urbano (S.M.T.U.). Esta empresa es de gestión pública y como la mayoría de este tipo es municipal, es decir, depende directamente del Ayuntamiento. En

la actualidad existen dieciséis líneas regulares en todo el municipio, más un servicio especial de verano y fines de semana.

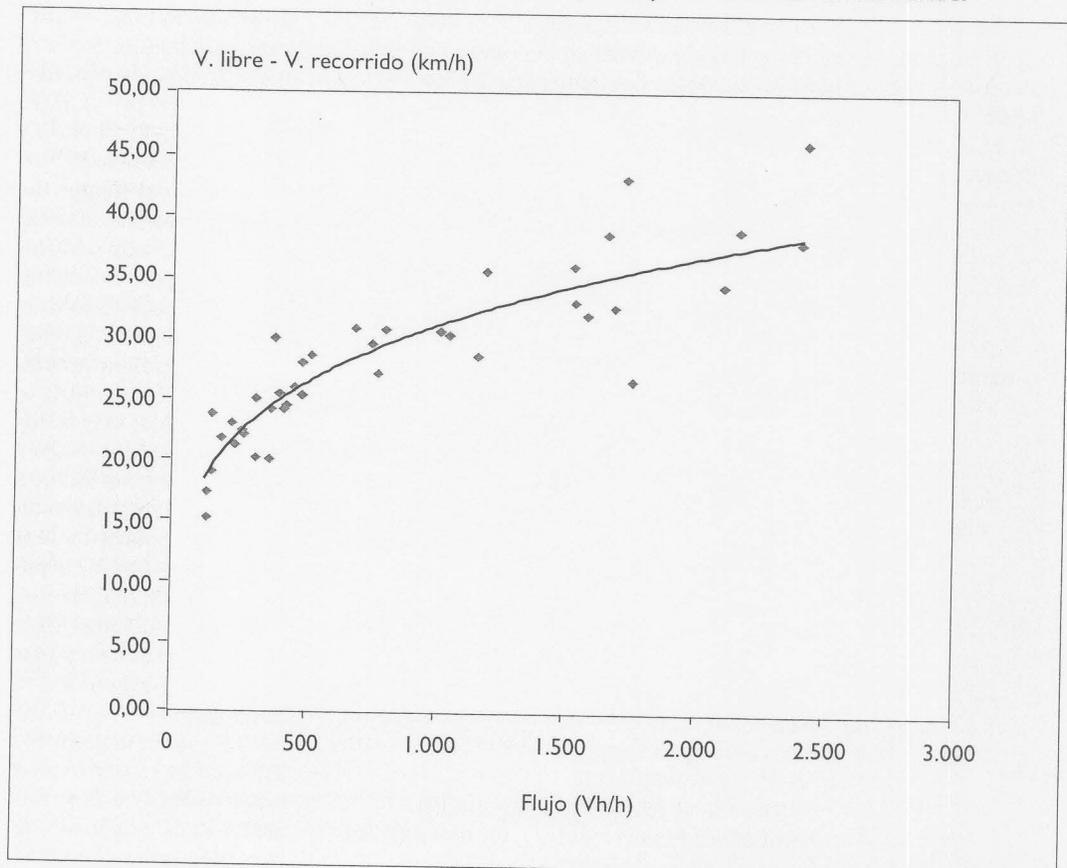
Se han recopilado los datos de 242 viajes realizados en autobús, con diversos orígenes y destinos de viaje, en paradas diferentes, con usuarios de diferentes líneas, dentro de la franja horaria entre las 7:30 horas y las 9:30 horas, considerando este intervalo una hora punta por la mañana, tanto para los vehículos privados como para los autobuses de servicio público. Estos viajes se han realizado en diferentes días y diversas épocas del año, considerando las incidencias climatológicas y condicionantes externos que puedan aparecer en la infraestructura viaria. De los viajes, se han obtenido los tiempos de espera de los viajeros, de manera que se puedan modelizar matemáticamente con unas variables representativas (intervalo y tiempo de

recorrido desde la cabecera hasta la parada de espera de cada viajero).

Muchas ciudades reservan carriles para el uso exclusivo de los transportes públicos. Este no es el caso de Santander, donde el número de carriles no es excesivamente elevado en ninguna de sus vías como para dedicar uno de ellos exclusivamente a la circulación del transporte público urbano. Tampoco existe ninguna otra preferencia en la circulación de los autobuses urbanos en Santander.

Con relación a las variables de tráfico, se ha tomado como referencia un modelo secuencial de movilidad y demanda de vehículos, donde se incluye una asignación de vehículos sobre la red viaria de Santander dentro de la franja horaria indicada anteriormente, siendo contrastado el resultado de dicho modelo con volúmenes de vehículos y velocidades a partir de datos obtenidos en el Centro de Control de Tráfico de Santander.

Figura 3. Relación entre la velocidad de recorrido y el flujo de vehículos en Santander



Además, se ha ajustado la velocidad de recorrido de los vehículos según el flujo que circula por las diferentes calles de la ciudad. El ajuste entre la velocidad y el volumen de los vehículos, con un coeficiente de correlación  $R^2 = 0,8117$ , es el siguiente:

$$(v_{0,t} - v_{rt}) = 5,9491 i_t^{0,2397} \quad (18)$$

En la curva ajustada se puede observar que no existe un aumento tan pronunciado de la diferencia de la velocidad libre y velocidad de recorrido para valores altos del volumen de vehículos. Esto es debido a que el volumen de vehículos todavía está lejos de alcanzar la capacidad de la calzada en el sentido de avance de los vehículos. Los valores de flujo más altos, 2.406 y 2.427 vehículos por hora en dos carriles de circulación, corresponden a unas relaciones volumen y capacidad de 61,7% y 65,6% respectivamente; posibilitando una disminución más significativa de la velocidad de recorrido para volúmenes más elevados, que los medidos entre el periodo horario entre las 7:30 horas y 9:30 horas.

El tiempo de espera en las paradas para los usuarios del transporte público colectivo urbano de la ciudad de Santander, será:

$$t_{w,l,i,j} = 0,0103 + 0,3467 * \left( \frac{1}{\sum_{l=1}^{n_l} \left( \frac{1}{h} \right)_l} \right) + 0,0579 * \sum_{l=1}^{n_{t,i}} \left( \frac{l_{t,l}}{v_{r,t,l}} \right) \quad (19)$$

$$t_{w,l,i,j} = 0,0103 + 0,3467 * \left( \frac{1}{\sum_{l=1}^{n_l} \left( \frac{1}{h} \right)_l} \right) + 0,0579 * \sum_{l=1}^{n_{t,i}} \left( \frac{l_{t,l}}{v_{0,t,l} - 5,949 * i_t^{0,2397}} \right)$$

Para ello se ha realizado un análisis estadístico de las variables y los datos de los viajeros.

## Cuadro 2

### AJUSTE DEL MODELO DE TIEMPO DE ESPERA EN LA CIUDAD DE SANTANDER

| Estadísticas de la regresión                 |               |               |
|--|---------------|---------------|
| Coefficiente de correlación múltiple         | 0,888746625   |               |
| Coefficiente de determinación R <sup>2</sup> | 0,789870564   |               |
| R <sup>2</sup> ajustado                      | 0,788112159   |               |
| Observaciones                                | 242           |               |
|  | Coefficientes | Estadístico t |
| Intercepción                                 | 0,010324191   | 3,819410789   |
| Variable (h)                                 | 0,346687101   | 29,94066419   |
| Variable (l/v)                               | 0,057888901   | 3,271941888   |

De los resultados obtenidos se puede observar que el intervalo entre autobuses y la densidad de líneas que posibilitan realizar un viaje son las variables más significativas en el tiempo de espera de los usuarios. Si el movimiento de los autobuses fuese perfectamente regular y en todos los periodos temporales la velocidad de recorrido desarrollada fuese siempre la misma con un flujo de vehículos constante, es de esperar que el tiempo de espera medio sea la mitad del intervalo ( $\beta_h = 0,5$ ). En este caso el parámetro del intervalo y la densidad de líneas vale menos ( $\beta_h = 0,3467$ ). Esto quiere decir que en el tiempo de espera inciden otras variables menos significativas pero que son también importantes y percibidas por el usuario, como el tiempo de recorrido desde la cabecera de salida hasta la parada de espera ( $\beta_v = 0,0579$ ). También es significativo el parámetro independiente ( $\beta = 0,0103$ ), en donde es de esperar que existen otras variables que influyen en menos medida que el intervalo y el tráfico existente. Estas variables pueden ser: el número de paradas existentes desde la cabecera hasta la parada de espera, la demanda de viajeros existente en las paradas precedente y el tiempo de servicio de los autobuses en las paradas. También se ha observado que el aumento del tráfico y la reducción de la velocidad de recorrido son las variables más importantes en aquellos viajeros cuya parada de acceso está alejada de la cabecera de la línea, sobre todo si el recorrido de la línea antes de llegar a la parada ha sido por el centro de la ciudad donde existen tramos con mayor flujo de vehículos.

## CONCLUSIONES

El uso compartido de la red viaria entre autobuses y vehículos privados significa una interacción del tráfico en la operación de la red de autobuses de un transporte público urbano que incide sobre el nivel de congestión de la red de calles de la ciudad.

El efecto del tráfico sobre el tiempo de espera de los usuarios se puede modelizar mediante formulaciones sencillas ajustadas mediante análisis de regresión. Dichos modelos permiten obtener una herramienta fácil, sencilla y rápida para tomar las medidas oportunas de planificación y optimización del sistema de transporte público ante cualquier situación del tráfico que aparezca en la red viaria. Además estos modelos consiguen expresar el tiempo de espera en función de alguna de las variables fundamentales del tráfico, en este caso, el flujo de vehículos privados.

Además del intervalo teórico de paso de dos autobuses consecutivos de una misma línea y la densidad de líneas que posibilitan realizar un viaje, el tiempo de espera del usuario en las paradas depende del flujo de vehículos en los tramos de la red por donde circulan los autobuses, desde la primera parada de la línea hasta cada una de las paradas en donde existen viajeros.

El tiempo de espera del usuario en las paradas está relacionado con la ubicación de la parada y su distancia con la cabecera o parada inicial. En caso de existir unos flujos de vehículos elevados y disminuir la velocidad de recorrido en los tramos de la red viaria por debajo de la velocidad comercial de diseño, aumentará el tiempo de espera, ya que se obtienen unos intervalos reales entre autobuses mayores que los intervalos teóricos propuestos por la empresa que se encarga del transporte público urbano. El efecto del flujo de vehículos en el recorrido de los autobuses provocará un mayor aumento del tiempo de espera en paradas lejanas a las cabeceras, sobre todo si la oferta de servicios y la densidad de líneas para realizar un mismo viaje es escasa.

Según los coeficientes obtenidos en la aplicación anterior, el peso del intervalo de autobuses tiene un valor por debajo de 0,5 ( $\beta_h = 0,3467$ ), pues se ha considerado la densidad de líneas como una variable que permite reducir el tiempo de espera en las paradas ya que permite aumentar la

posibilidad de realizar un viaje. El valor del coeficiente de la componente del tráfico ( $\beta_t = 0,0579$ ) permite concluir que sobre el tiempo de espera en las paradas, el efecto del tráfico es significativo, y sobre el tiempo de recorrido del autobús es casi 6 veces menor que el efecto que tiene el intervalo teórico propuesto por la empresa.

Existen otras variables que son representativas del tiempo de espera de los viajeros, como el número de paradas existentes desde la cabecera hasta la parada de espera, la demanda de viajeros existente en las paradas precedentes, las características geométricas de la red viaria y el tiempo de servicio de los autobuses en las paradas.

De la aplicación práctica desarrollada, el efecto del tráfico sobre el transporte colectivo depende del periodo horario. A primeras horas de la mañana de los días laborables tiene más incidencia a las afueras de la ciudad debido a la gran cantidad de vehículos que salen y entran de la ciudad por motivo laboral, causando mayores tiempos de espera en las paradas de líneas que se mueven fuera del centro urbano.

También, existen viajeros regulares de las líneas de autobús que son conocedores de los intervalos y horarios de los autobuses, de tal forma que su llegada a las paradas no es aleatoria y el modelo es poco representativo. Esto produce que el coeficiente ( $\beta_h$ ) sea algo menor de 0,5.

## BIBLIOGRAFÍA

- BYRNE, B. F. (1976): «Cost minimising positions, lengths and headways for parallel public transit lines having different speeds». *Transportation Research*, nº 10.
- CHRIQUI Y ROBILLARD P. (1975): «Common bus lines». *TRANSPORTATION SCIENCE*, Vol. 9.
- DAGANZO, Carlos F. (2000): «Fundamentals of Transportation and Traffic Operations». ED: Elsevier Science, Kidlington Oxford, UK. ISBN 0-80-042785-5.
- DE CEA Ch., J. (1998): «Calibración de funciones flujo-costo para un modelo de asignación de transporte público con restricción de capacidad». Actas del X Congreso Panamericano de Ingeniería de Tránsito y Transporte. Santander. Ed. Ministerio de Fomento. 283-298. (I.S.B.N.: 84-498-0359-4).

- De Cea Ch., y FERNÁNDEZ J. E. (1993): «Transit Assignment for congested public transport systems: an equilibrium model». *Transportation Science*. Vol. 27(2).
- GENDREAU, M. y NGUYEN, S. (1991): *Modeling Bus Stops in Transit Networks: A Survey and New Formulations*. *Transportation Science*. Vol. 35(3).
- JARA DÍAZ, Sergio R. y GSCHWENDER (2003): «Towards a general microeconomic model for the operation of public transport». *Transport Reviews*. Vol. 23(4).
- TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (T.R.B.) (2000): «Highway Capacity Manual». Washington.
- MERINO, E. y ROBUSTÉ, F. (1998): «Optimización de la operación de autobuses en corredores de transporte público en ciudades intermedias». *Actas del III Congreso de Ingeniería del Transporte*. Barcelona.
- MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS, TRANSPORTES Y MEDIO AMBIENTE (M.O.P.T.M.A.) (1994): «La demanda de transporte en España. Competencia intermodal sobre el ferrocarril urbano». Serie Monografías. Instituto de Estudios del Transporte y las Telecomunicaciones.
- MOHRING, H. (1976): «Transportation economics». Casmbridge.
- MOLINERO MOLINERO, Ángel R. (1996): «Transporte público: planeación, diseño, operación y administración». Ed. Quinta del Agua, S. A. de C. V. México.
- SÁNCHEZ BLANCO, Víctor y GARDETA OLIVEROS, Juan (1997): «Ingeniería de tráfico vial». Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Servicio de publicaciones. Madrid.
- VEGA ZAMANILLO, A., ROBUSTÉ ANTÓN, F., IBEAS PORTILLA, A. y DELL'OLIO, L. (2004): «Un modelo de optimización de un sistema de transporte público urbano considerando el tráfico en la ciudad». *Revista Carreteras*. Epoca nº 4. Julio-agosto.