

Modelo de Espaciamiento y Localización de Paradas de Bus en Áreas Urbanas

Ángel Ibeas Portilla. Profesor Titular de Transportes,
Luigi dell'Olio. Profesor Ayudante Doctor,
Jose Luis Moura Berodia. Profesor Titular de Transportes,
Borja Alonso Oreña. Investigador y
Francisco José Ruisánchez Díaz. Investigador
Departamento de Transportes y Tecnología de Proyectos y Procesos.
Universidad de Cantabria. ETS Ing. de Caminos, Avda Los Castros s/n 39005 Santander (Cantabria, España)
E-mail: ibeasa@unican.es, delloloi@unican.es, mourajl@unican.es, alonsobo@unican.es, ruisanchezfj@unican.es

RESUMEN

En esta investigación se desarrolla un modelo de optimización binivel de ubicación y espaciamiento óptimo de paradas de bus que minimiza el coste social de todo el sistema de transporte, teniendo en cuenta los posibles cambios en la demanda debidos a las diferentes localizaciones de las paradas, y considerando además el escenario de congestión en los buses, interacción con el tráfico privado, así como las variables operacionales que sea necesario controlar en función de cada caso de estudio (flota, frecuencia, presupuesto del operador, etc). El trabajo se estructura en dos bloques: un primer bloque a nivel estratégico, en el que se hace una primera ubicación de paradas a nivel macroscópico, en el que se minimiza el coste social total, y un segundo bloque a nivel táctico en el que se afina dicha ubicación en un eje a nivel microscópico en el que ya se tienen en cuenta todos los fenómenos de colas, coordinación semafórica, etc. Finalmente se expone su aplicación a un caso real y se realiza un análisis de sensibilidad para comprobar la influencia que tienen las distintas variables analizadas en la solución dada por el modelo.

ABSTRACT

This research work develops a bi-level optimization model for finding the best location and distribution of bus stops to minimize the social cost of the overall transport system. The work takes into account any possible changes in demand due to the different locations used for the bus stops, as well as considers congestion on the buses, interaction with private traffic and the operational variables which need to be controlled depending on each study case (fleet, frequency, operator budgets, etc). This research is structured in two levels: strategic level, in which it makes a first location of bus stops using a macroscopic simulation model, in which the total social cost is minimized, and tactical level in which this location is tuned using a microscopic simulation model. Finally, the technique is applied to a real case and a sensitivity analysis is performed to check how the different variables analysed influence the solution provided by the model.

1. INTRODUCCIÓN

Dentro de una gestión eficiente de los recursos de un sistema de transporte público, resulta primordial el correcto diseño de itinerarios, horarios, frecuencias y flota necesaria. Sin embargo, a la hora de implantar un sistema de transporte público en una ciudad, o modificar uno existente, cobra una especial relevancia la ubicación de las paradas de bus. Una distribución racional de las paradas puede ser ventajosa no solo para el sistema de transporte, sino que también lo puede ser para el tráfico rodado en general. Varios estudios se han orientado en esta dirección aplicando modelos macroscópicos analíticos (Wirasinghe y Ghoneim, 1981, Schonfeld y Chang, 1991, Laporte et al., 2002, Chien y Zhaoqiong, 2004), o sistemas expertos (Fernandez, 1993a) por poner algunos ejemplos.

En los últimos años han surgido trabajos de investigación en los que se estudia con más detalle la operación e influencia de una parada de bus de manera más específica (Fernandez, 2001, 2003), diseñando aplicaciones para modelos de microsimulación tales como PASSION (Fernandez, 1993b; Fernández y Planzer, 2002), IRENE (Gibson et al, 1989, Gibson, 1996) o MISTRANSIT (Burgos et al, 2005; Cortés et al., 2007).

Este trabajo combina varias de estas investigaciones precedentes empleando un modelo de espaciamiento y ubicación de paradas a nivel macroscópico considerando las restricciones de capacidad de los buses (dell'Olio et al., 2006) con un modelo microscópico donde se afina dicha ubicación en función de la existencia de semáforos, incidencias en la red, etc.

2. DESCRIPCIÓN DEL MODELO PROPUESTO

El modelo propuesto se estructura en dos bloques: un primer bloque a nivel estratégico, en el que se hace una primera ubicación de paradas a nivel macroscópico, empleando un modelo de optimización bi-nivel en el que se minimiza el coste social total, y un segundo bloque a nivel táctico en el que se afina dicha ubicación en un eje mediante un modelo de microsimulación donde se maximiza la velocidad comercial del sistema de transporte público.

Para la resolución del problema de localización de paradas a nivel macro se plantea un Modelo matemático de Optimización Bi-nivel, compuesto de un nivel superior que minimiza una función de costes tanto del usuario como del operador (dell'Olio et al., 2006), y un nivel inferior de en el que se incluye un modelo de partición modal-asignación (De Cea et al., 2001) teniendo en cuenta la influencia del tráfico privado y la congestión en los vehículos de transporte público.

La estructura de costes que se utiliza en la función objetivo del primer nivel considera los costes de los usuarios (UC) y los costes del operador (OC). Los costes de los usuarios se obtienen por simulación, los cuales están afectados por las variables de decisión y su formulación incluirá los costes experimentados debidos al viaje en vehículo, acceso, espera y transbordo:

$$UC = \phi_a TAT + \phi_w TWT + \phi_v TIVT + \phi_t TTT + \phi_{va} TCCTT \quad (1)$$

Donde: *TAT*: Tiempo Total de Acceso; *TWT*: Tiempo Total de Espera; *TIVT*: Tiempo Total de Viaje en vehículo; *TTT*: Tiempo Total de Tránsito; *TCCTT*: Tiempo Total de Viaje en Coche; ϕ_a : Valor del tiempo de acceso; ϕ_w : Valor del tiempo de espera; ϕ_v : Valor del tiempo de viaje en vehículo; ϕ_t : Valor del tiempo de transbordo y ϕ_{va} : Valor del tiempo de viaje en auto.

Los costes del operador se consideran como la suma de los costes directos más los costes indirectos (Ibeas et al., 2006). Los Costes Directos (CD) se componen de cuatro factores: Costes de rodadura (km recorridos) (CK), los costes horarios debidos al ralentí (CR), los costes de personal (CP), y los costes fijos (CF). Los Costes Indirectos (CI) por otros estudios realizados se suponen entorno al 12% de los Costes Directos.

$$OC = 1.12 \cdot \left[\sum_l \sum_k L_l f_l CK_k \delta_{k,l} + t_{sb} \sum_l \sum_k CR_k \delta_{k,l} Y_l + CP \sum_l \left(\frac{tc_l}{h_l} \cdot 60 \right) + \sum_l \sum_k \left(\frac{tc_l}{h_l} \cdot 60 \cdot CF_k \cdot \delta_{k,l} \right) \right] \quad (2)$$

Donde: L_l : Longitud de la línea l ; f_l : frecuencia de la línea l ; CK_k : coste unitario por kilómetro de rodadura del autobús de tipo k ; $\delta_{k,l}$: variable muda que vale 1 si el autobús de tipo k será asignado a la línea l y 0 en caso contrario; t_{sb} : tiempo promedio de subida y bajada de los pasajeros; CR_k : coste unitario por hora en ralentí del autobús de tipo; Y_l : demanda de viaje de la línea l que se obtiene por simulación; h_l : intervalo de la línea l ; C_p : es el coste unitario por hora del personal y tc_l : es el tiempo de ciclo.

Los costes de construcción (o destrucción si fuese el caso) de las paradas se omiten en la función objetivo. Esta hipótesis no se considera desacertada puesto que su coste es sufragado en muchos casos por la empresa concesionaria de los derechos publicitarios en las mismas.

En base a esta estructura de costes queda definido el problema de optimización al nivel superior:

$$\begin{aligned} \min \quad & Z = \phi_a TAT + \phi_w TWT + \phi_v TIVT + \phi_t TTT + \phi_{va} TCCTT + \\ & + 1.12 \cdot \left[\sum_l \sum_k L_l f_l CK_k \delta_{k,l} + t_{sb} \sum_l \sum_k CR_k \delta_{k,l} Y_l + \right. \\ & \left. + CP \sum_l \left(\frac{tc_l}{h_l} \cdot 60 \right) + \sum_l \sum_k \left(\frac{tc_l}{h_l} \cdot 60 \cdot CF_k \cdot \delta_{k,l} \right) \right] \quad (3) \\ \text{s.a.} \quad & \delta_{k,l} \in \{0,1\} \\ & \zeta \leq \zeta_0 \end{aligned}$$

Donde la primera restricción define las características de las variables $\delta_{k,l}$ que son variables binarias y la segunda representa el conjunto de restricciones operacionales que se quieran implementar en el modelo, como pueden ser la restricción de flota, presupuesto de explotación, frecuencias máximas y mínimas permitidas, etc.

El nivel inferior se modela a través de un modelo combinado de Partición Modal-Asignación (De Cea et al., 2001). Las condiciones de equilibrio para el problema que se considera

pueden formularse mediante una desigualdad variacional del siguiente tipo:

$$c(X^*) \cdot (X - X^*) - g(T^*) \cdot (T - T^*) \geq 0, \quad \forall X, T \in \Omega \quad (4)$$

Donde: c es el vector de costes en los arcos de la red, g es el vector de funciones inversas de demanda, X es cualquier vector factible de flujos en la red multimodal, X^* representa la solución de equilibrio en términos de flujos sobre la red multimodal, T es el vector de viajes entre pares origen-destino de la red multimodal y T^* es el vector de viajes de equilibrio entre pares origen-destino de la red multimodal.

El problema de optimización equivalente para el problema diagonalizado de Partición Modal y Asignación conjuntas aplicado en este modelo es el siguiente:

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_m \sum_a \int_0^{f_a^m} c_a^m(x) dx + \sum_m \sum_a \int_0^{V_s^m} c_s^m(x) dx + \\ & + \sum_n \frac{1}{\lambda} \sum_w T_w^n (\ln T_w^n - 1) - \sum_n \frac{1}{\gamma^n} \sum_w T_w^n (\ln T_w^n - 1) + \sum_n \frac{1}{\gamma^n} \sum_{m \in n} \sum_w T_w^m (\ln T_w^m - 1) \\ \text{s.a.:} \quad & T_w = \sum_n T_w^n, \quad \forall w \in W \\ & T_w^n = \sum_{m \in n} T_w^m, \quad \forall w, n \\ & T_w^m = \sum_{r \in P_w^m} h_p^m, \quad \forall w, m \\ & f_a^m = \sum_{p:w} h_p^m \cdot \beta_{ap}, \quad \forall a, \tilde{m} \\ & V_s^m = \sum_{p:w} h_p^m \cdot \beta_{sp}, \quad \forall s, \bar{m} \\ & h_p, V_s^m, f_a^m \geq 0 \quad \forall p, s, a, \tilde{m}, \bar{m} \\ & \beta_{ap} \in \{0,1\} \quad \forall a, p \end{aligned} \quad (5)$$

Donde: W : Conjunto de pares origen-destino O-D; w : Elemento del conjunto W , en que $w=(i, j)$, con i, j centroides, T_w : Número total de viajes entre el par O-D w ; R : Conjunto de rutas disponibles para usuarios de transporte público; r : Índice para designar una ruta en transporte público; \bar{h}_p : Flujo de pasajeros de transporte público sobre la ruta p ; s : Índice para designar una sección de ruta en transporte público; S : Conjunto de secciones de rutas disponibles para usuarios de transporte público; c_s : Coste de viaje para usuarios de transporte público sobre la sección de ruta s ; β_{sp} : Elemento de la matriz de incidencia sección de ruta-ruta; β_{ap} : Elemento de la matriz de incidencia arco-ruta; V_s : Flujo de pasajeros en la sección de ruta s ; a : arcos de la red; m : modo de transporte y n : nido del árbol de decisión.

Obviamente, al conjunto de restricciones aquí descritas se les deberá añadir las restricciones de repartición de flujos en arcos de transporte público a secciones de línea.

Una vez que el modelo encuentra el óptimo presenta como resultados una primera ubicación de paradas de transporte público en la red, así como la demanda horaria asociada a cada una de ellas y por cada línea de transporte. Sin embargo, debido a limitaciones de la escala de simulación, esta ubicación no es lo suficientemente exacta como para tener en cuenta la interacción con los efectos dinámicos del tráfico y sus fenómenos asociados (spillback, cambios de carril, incorporaciones desde las paradas al flujo de tráfico, coordinación semafórica, etc.).

Es aquí donde entra en juego el modelo de microsimulación planteado. La solución del modelo macroscópico se vuelca mediante GIS y API en el modelo de microsimulación.

Así, para cada punto planteado, en función de su ubicación inicial, se proponen varias alternativas. Sirva como ejemplo el caso de que, en una parada ubicada en las inmediaciones de un semáforo, se plantearán alternativas de ubicación desplazando la parada aguas arriba o aguas abajo del mismo. Además, gracias a las ventajas que presentan los modelos de microsimulación, se han programado API's en las que se puede variar el ciclo semafórico, la coordinación de la red semafórica, tipología de parada (en arcén, bahía, etc.), patrón de llegada de los viajeros a la parada, introducir factores de hora punta, etc. Se puede definir por lo tanto el método que aquí se propone como un refinamiento del proceso de macrosimulación, con el cual se afina aun más el proceso de ubicación de una parada de bus según el parámetro del tráfico que desee el planificador: velocidad comercial del transporte público, demoras totales, demoras del vehículo privado, etc.

3. ALGORITMO DE SOLUCIÓN

El algoritmo de solución desarrollado para resolver el problema de optimización es una heurística que se compone de varias etapas (figura 1):

Paso 1. En la primera iteración, una vez se tiene discretizada la red del área de estudio para albergar todos los potenciales puntos de parada, se genera un vector solución inicial factible de distanciamiento de paradas (δ^0) de acuerdo a características descriptivas de cada zona (densidad de población, nivel de ingresos, etc.), que generalmente es la situación actual de la red.

Paso 2. Se resuelve el problema de optimización al nivel inferior del modelo planteado y se calcula la función objetivo de costes del nivel superior (Z^i).

Paso 3. Se generan nuevos valores de (δ^{i+1}) utilizando el algoritmo de Hooke-Jeeves (Hooke y Jeeves, 1961) y se resuelve el problema del nivel superior sujeto a las restricciones operacionales y de satisfacción de la demanda, para determinar el nuevo valor de Z^{i+1} , a partir del cual vuelve a ejecutar el paso 2.

Paso 4. Si $Z^{i+1} - Z^i > \tau$ se vuelve al paso 3 si $Z^{i+1} - Z^i \leq \tau$ se para el algoritmo, siendo τ la reducción del valor de la función objetivo establecida como criterio de parada.

Paso 5. Se vuelca la solución del paso 4 al modelo de microsimulación al eje de estudio.

Paso 6. Se inicializa el vector con una solución inicial (λ^0) de ubicación de paradas y se generan nuevos valores de (λ^{i+1}) utilizando un algoritmo full search que recorra toda la secuencia combinatoria, obteniendo para cada caso el valor de la velocidad comercial en el eje (v^i).

Paso 7. Se realiza la búsqueda del mínimo valor del vector (v), obteniendo la ubicación definitiva.

4. APLICACIÓN A UN CASO REAL

Para comprobar la validez del modelo propuesto, se ha aplicado a un caso real. El área de estudio utilizada ha sido la ciudad de Santander, una ciudad de tamaño medio, de aproximadamente 180.000 hab situada al norte de España y que actualmente cuenta con un sistema de transporte urbano en superficie (bus) ya consolidado. Dicho sistema se compone de 16 líneas, de las cuales 3 son circulares en ambos sentidos. Los intervalos varían de los 12 a los 30 minutos. La ciudad se caracteriza por su estructura lineal, con un centro de gran desarrollo comercial y urbanístico y varias zonas residenciales en la periferia de desigual densidad de población (figura 1).

Previamente se ha discretizado la red en segmentos de 60 metros de longitud para afinar lo máximo posible la ubicación de cada parada, dadas las restricciones del software. Se ha desarrollado un GIS en el que se tiene, para cada zona de la ciudad, sus características económicas, sociales y demográficas, así como, para cada nodo, sus atributos más significativos: tipología (intersección, ruteador...), regulación (semáforo) y ubicación (si está o no en rampa, si existen zonas residenciales o puntos especiales a una distancia máxima, si es un punto "obligado" de parada, etc.) entre otros. La agregación zonal de la ciudad se ha establecido en base a densidad de población y actividad comercial. De esta forma, se han obtenido cinco grupos de zonas con igual distanciamiento (en metros) entre paradas (δ^0): (240, 300, 360, 360, 840).

Para el cálculo de la función de costes sociales, se han utilizado los valores del tiempo extraídos de la realización de más de 1000 encuestas de Preferencias Reveladas que se han hecho en Santander en Febrero de 2008 (tabla 1).

Tal y como se ha expuesto en el apartado anterior, en un primer bloque se estima el distanciamiento y ubicación óptima a nivel macroscópico para lo cual se ha empleado el software ESTRAUS para el modelo de reparto modal-asignación y MATLAB para la programación del algoritmo y el cálculo de la función de costes social.

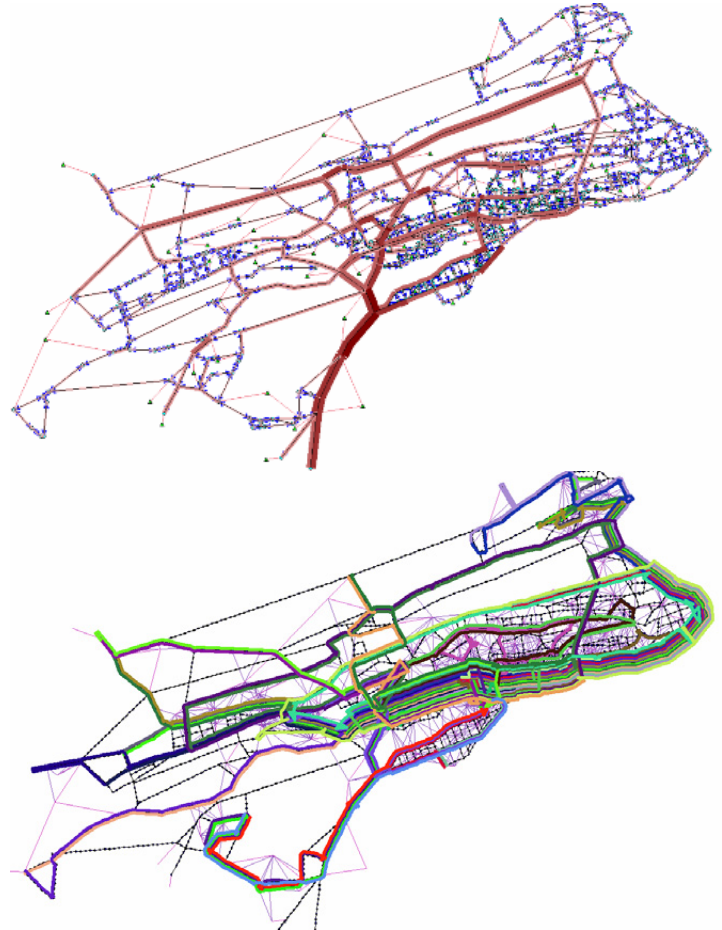


FIGURA 1: Asignación de Tráfico Privado y Red de Transporte Público

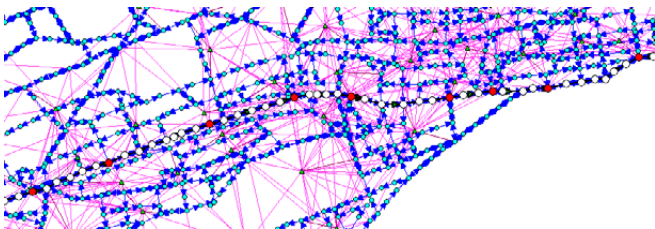
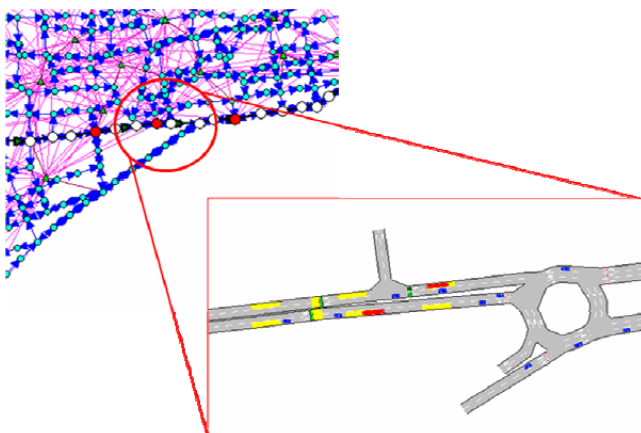
TABLA 1: Valores del Tiempo Utilizados

Variable	Valor
Tiempo viaje (BUS)	26.43 €/h
Tiempo espera (BUS)	51.29 €/h
Tiempo acceso (BUS)	31.01 €/h
Tiempo transbordo (BUS)	79.77 €/h
Tiempo viaje (AUTO)	28.90 €/h

Es evidente que los puntos de parada obtenidos en este primer bloque, deben ser afinados, especialmente en aquellas zonas de la ciudad de mayor intensidad de tráfico, donde la existencia de ciertos elementos de control puede alterar significativamente el correcto funcionamiento de la parada. Para ello será necesario recurrir a una escala mucho más detallada, con lo que los outputs obtenidos del modelo de macrosimulación, aplicado a toda la ciudad, serán los inputs del modelo de microsimulación en estas zonas problemáticas.

En esta aplicación, se ha seleccionado el eje principal de la ciudad, de aproximadamente 2,5 km de longitud, el cuál es atravesado por 11 líneas del transporte público con un total de 43 buses/hora y sentido. A su vez, por dicho eje circulan aproximadamente 1700 vehículos/hora punta y sentido. La tipología de la red vial es de dos carriles de 3 metros de anchura media.

Como ya se ha expuesto en la sección anterior, la posición en torno a la que se propondrán las diferentes alternativas para cada parada del corredor no se ha realizado al azar, si no que es fruto de un modelo de optimización que minimiza el coste social del sistema. En la figura.2 se puede ver el corredor seleccionado y los puntos de parada elegidos por el modelo de macrosimulación. Estos puntos servirán como guía para construir el escenario del modelo de microsimulación. En torno a la posición indicada por cada punto, se propondrán varias alternativas de posicionamiento de la parada (figura 3), obteniendo al final del proceso la localización óptima final que maximiza la velocidad comercial de los buses en el eje.

**FIGURA 2: Ejemplo de Ubicación Macroscópica de Paradas de Bus****FIGURA 3: Paso del Modelo Macro al Modelo Micro**

Una vez seleccionadas las diferentes posibilidades para cada parada se procede a simular los diferentes escenarios que se generan mediante su combinación. Para poder llevar a cabo el proceso de combinación, generación y simulación de cada escenario se ha usado el simulador AIMSUN sobre el cual se ha realizado una macro programada en lenguaje Python para realizar el proceso de forma automatizada. En el corredor ejemplo se tienen 8 paradas de las cuales 4 de ellas son susceptibles de poseer varias posiciones, mientras que las otras 4, por motivos de la topología de la zona, no pueden tener otra alternativa. A la hora del diseño de los experimentos se consideraron diferentes patrones de llegada de los usuarios a las paradas, en un primer caso se consideró que la llegada era constante mientras que en otro caso esta llegada se tomó como exponencial. Esto, lógicamente, influirá directamente en el tiempo que cada autobús está detenido en cada parada.

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En primer lugar se analizarán los resultados obtenidos del modelo macroscópico, los cuales se resumen en la tabla 2, donde se puede apreciar cómo se ha conseguido reducir el número total de paradas, mejorando su distribución en la ciudad de tal forma que se ha logrado disminuir el tamaño de flota requerido, se ha aumentado la velocidad comercial y se ha conseguido un ligero aumento de los usuarios del transporte público.

TABLA 2: Aplicación de Optimización de Paradas a Nivel Macro en Santander

	$\bar{\delta}$ (m)	Paradas	Viajeros	Flota (buses)	Coste Social (€)	Velocidad comercial BUS (km/h)
Situación actual	[240,300, 360,360, 780]	295	4944	63	59.338.533	11.88
Situación optimizada	[360,420, 540,420, 780]	264	5109	61	58.603.450	13.07

Como era de esperar, se aprecia una fuerte sensibilidad del coste social a la ubicación de paradas, guardando relación con los viajeros del sistema de transporte público (figuras 4 y 5). Así, para casos en los que la densidad de paradas es muy elevada, los tiempos de viaje en bus aumentan considerablemente, produciéndose una disminución de viajeros en transporte público, y requiriéndose aumentos de flota para mantener las frecuencias. En la medida que el número de paradas disminuye, aumenta la importancia de su ubicación y distribución. Por ello, para un mismo número total de paradas se aprecian fuertes variaciones en el valor de la función de coste social, viajeros en transporte público y en el tamaño de flota requerida.

Cuando la densidad de paradas sigue bajando (hasta el mínimo posible por restricciones de cabeceras, puntos fijos, etc.), el tamaño de flota requerido no disminuye, sino que, en general, aumenta (figura 6). Esto es debido a que el número de viajeros en transporte público se reduce, lo que provoca que aumente la congestión del tráfico, repercutiendo directamente en el tamaño de flota necesario para mantener las frecuencias. Esta variable es especialmente sensible a la ubicación de las paradas, puesto que, para un mismo número global, la distribución influye notablemente a la hora del reparto modal.

Observando la evolución del valor de la función de coste social, número total de paradas de bus, y viajeros de transporte público en el sistema a lo largo de las iteraciones en los diferentes escenarios probados, se aprecia que dada una red urbana, con una configuración de líneas determinada, existe un valor de equilibrio para el número de paradas, el valor del coste social total y para los viajeros de transporte público.

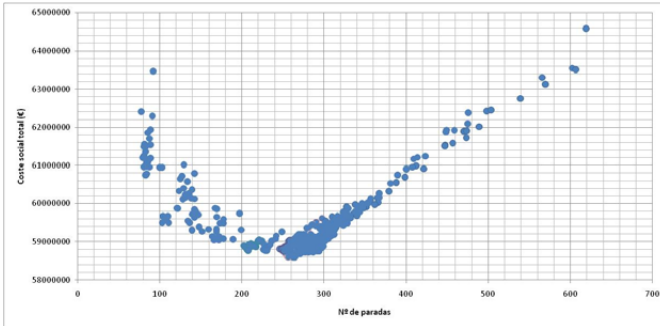


FIGURA 4: Relación entre el Coste Social Total y el Número de Paradas de Bus

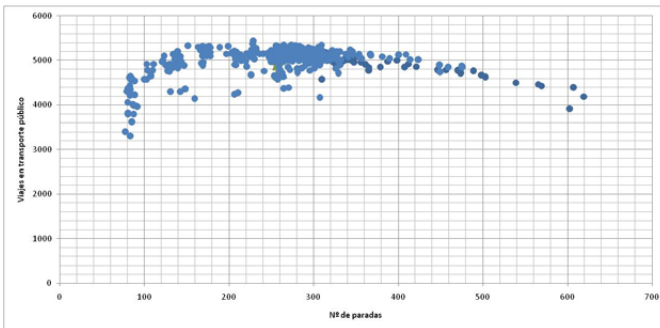


FIGURA 5: Relación entre el Número de Viajes en Bus y el Número de Paradas

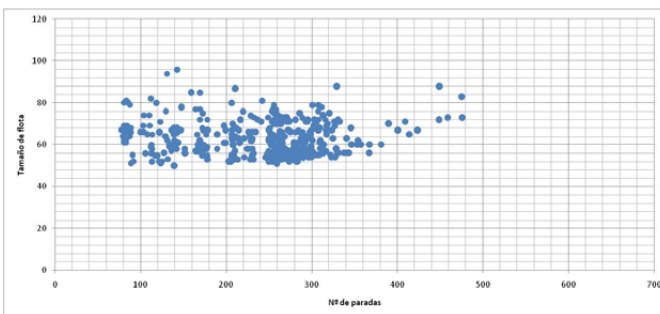


FIGURA 6: Relación entre el Tamaño de Flota y el Número de Paradas: Efectos de la Congestión en el Transporte Público

Con los resultados parciales del modelo macroscópico, se aplica el modelo de microsimulación. Observando los resultados de las alternativas de ubicación analizadas, se aprecia que el valor de la velocidad comercial en el eje varía sensiblemente al cambiar las ubicaciones de las paradas, teniendo su valor máximo en 12,1 km/h y su valor mínimo en 9,7 km/h para el caso de llegada de viajeros uniforme, y un valor máximo de 10,3 km/h y un valor mínimo de 6,9 km/h para el caso de llegada exponencial. En ambos casos, sin embargo, se ha obtenido la misma ubicación final que proporciona una mayor velocidad comercial.

Como resumen de esta ubicación final, destacar que, en caso de existencia de semáforos, las paradas se han ubicado aguas

abajo del mismo. Sin embargo, si aguas abajo de un semáforo existe otra intersección con longitudes de cola importantes, se desplaza aguas arriba de éste para evitar que se vea afectada por los vehículos en cola. Estos resultados concuerdan con las conclusiones de otras investigaciones realizadas y que se citan en la introducción de este trabajo. Finalmente, se ha realizado un análisis de sensibilidad aumentando y disminuyendo los flujos de vehículos y buses/hora, obteniendo en todos los casos la misma ubicación final.

6. CONCLUSIONES

En este artículo se ha desarrollado un modelo de ubicación de paradas de bus que en un primer paso a escala macroscópica minimiza el coste social de todo el sistema y en un segundo paso a escala microscópica afina la ubicación propuesta en los ejes más congestionados, maximizando la velocidad comercial del transporte público en dichos ejes.

En el análisis de sensibilidad realizado se ha podido comprobar la influencia del número y de la correcta ubicación de las paradas de bus en la elección modal de los viajeros, así como su repercusión en la congestión de la red vial y, por consiguiente, en el tamaño de flota requerido para operar el servicio. A su vez, se ha constatado el hecho de que, dada una red vial con un sistema de transporte público de itinerarios y frecuencias establecidos, se consigue un óptimo en el que se alcanza un equilibrio entre el número de paradas, viajeros de transporte público, tamaño de flota y, por consiguiente, coste social del sistema. La aplicación realizada a un caso real ha conseguido optimizar el sistema existente consiguiendo una mejora del servicio de transporte público con menos recursos.

En cuanto a la ubicación de paradas a nivel micro, destacar que, en caso de existencia de semáforos, las paradas se han ubicado aguas debajo de los mismos. Sin embargo, si en esa zona existe otra intersección con longitudes de cola importantes, se desplaza aguas arriba de éste para evitar que se vea afectada por los vehículos en cola. Por último, destacar la independencia obtenida en la ubicación microscópica con respecto a los patrones de llegada de viajeros, flujo de vehículos y flujo de buses.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Ministerio de Educación y Ciencia y al CEDEX del Ministerio de Fomento del Gobierno de España.

REFERENCIAS

- Burgos, V., Fernández, R. and Cortés, C. (2005) Desarrollo de un simulador de operaciones de transporte público en un ambiente de microsimulación de tráfico. **Actas del XII Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte**, Valparaíso, 245-258. Chile.
- Cortés, C., Fernández, R. y Burgos, V. (2007) Modeling passengers, buses and stops in traffic microsimulators. The mistransit approach on the paramics platform. **86th TRB Annual Meeting, Transportation Research Board**, January 21-25.
- Chien S, Zhaoqiong, O. Optimization of Bus Stop Locations for Improving Transit Accessibility. **Transportation Planning and Technology**, 27(3), 211–227, 2004.
- De Cea, J., Fernandez, J.E. (2001) ESTRAUS: a simultaneous equilibrium model to analyze and evaluate multimodal urban transportation systems with multiple user classes. **9th WCTR**, Seoul, Corea del Sur.
- Dell’Olio, L., Ibeas, A. y Moura, J. L. (2006) A bi-level mathematical programming model to locate bus stops and optimize frequencies. **Transportation Research Record, Journal of Transportation Research Board**.
- Fernandez, R., (1993) An expert system for the preliminary design and location of high-capacity bus-stop. **Traffic Engineering and Control**, 34 (11), pp. 533-539.
- Fernandez, R. (1993) Passion 5.0-a model for microscopic simulation of multiple-berth bus stops. **Traffic Engineering and Control**, 34 (11), pp. 533-539.
- Fernández, R. (2001) A new approach to bus stop modelling. **Traffic Engineering and Control**, 42(7), 240-246.
- Fernandez, R. (2003) Study of bus stop operation in arterial roads by simulation. **ITE Journal**, 73(4), 77-81.
- Fernández, R. and Planzer, R. (2002) “On the capacity of bus transit systems”. **Transport Reviews**, 22(3), 267-293.
- Gibson, J. (1996) Effects of a downstream signalised junction on the capacity of a multiple berth bus stop. **Proceedings 24th PTRC European Transport Forum**, London.
- Gibson, J., Baeza, I. y Willumsen, L.G. (1989) Bus-stops, bus-stops. **Traffic Engineering and Control**, 30(6) 291-296.
- Hooke, R., y Jeeves, T.A. (1961) Direct search solution of numerical and statistical problems. **Journal of the Association for Computing Machinery**, pp. 212-229.
- Laporte G, Mesa J, Ortega F. Locating stations on rapid transit lines. **Computers & Operations Research** 29, 741-759, 2002.
- Schonfeld, P., Chang, S. Multiple Period Optimization of Bus Transit Systems. **Transportation Research B**, Vol. 25B, N° 6. 1991.
- Wirasinghe, S. C., y Ghoneim, N. S. (1981) Spacing of bus stop for many to many travel demand. **Transportation Science**, 15(3), 210-221.