



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos

Tesis Doctoral

**MODELO DE LOCALIZACIÓN DE PARADAS DE
BUS CONSIDERANDO LA OPERATIVA E
INCIDENCIAS EN LA RED**

Autor

BORJA ALONSO OREÑA

Directores

JOSÉ LUIS MOURA BERODIA

ÁNGEL IBEAS PORTILLA

Santander, 2010

RESUMEN

En esta tesis se aborda el problema de localización de paradas de transporte público. Para ello se ha propuesto un modelo de localización de paradas de bus mediante la aplicación secuencial de dos enfoques: un primer enfoque estratégico en el que se localizan las paradas de bus en todo el sistema de transporte público a escala macroscópica y un segundo enfoque táctico a escala microscópica donde, a partir de la solución macroscópica obtenida, se afina la ubicación de paradas en ejes específicos de una ciudad.

El Modelo Macroscópico propuesto se basa en un modelo de optimización bi-nivel, compuesto de un nivel superior que minimiza una función de costes totales del sistema (Coste Social) y un nivel inferior en el que se incluye un modelo de partición modal-asignación. Además tiene en cuenta la influencia del tráfico privado, la operativa de la red vial y la congestión en los viales, vehículos de transporte público y paradas de bus.

Por su parte, el Modelo Microscópico propuesto se apoya en el modelo previo macroscópico y permite obtener la localización óptima de las paradas de autobús dentro de un corredor urbano atendiendo a maximizar la velocidad comercial del transporte público en dicho eje.

La validez y utilidad de los modelos propuestos se han comprobado mediante la aplicación a un caso real: la ciudad de Santander, donde se ha conseguido optimizar el sistema existente consiguiendo una mejora del servicio de transporte público con menos recursos, aumentando la velocidad comercial en un 10% y reduciendo la flota necesaria en un 3%. Además se ha realizado un profundo análisis de sensibilidad, analizando el comportamiento y la relación entre las diferentes variables del problema.

Finalmente, parte de las investigaciones de esta tesis han sido publicadas en dos artículos de revistas indexadas, junto con un tercero en revisión:

- Ibeas, A., Alonso, B., Moura, J.L. y Ruisánchez, F.J. (2009). Using M/M/∞ Queueing Model in On-Street Parking Maneuvers. *Journal of Transportation Engineering (ASCE)*, 135(8), pp. 527-535.
- Ibeas, A., dell'Olio, L., Alonso, B. and Sáinz, O. (2010). Optimizing bus stop spacing in Urban Areas. *Transportation Research Part E*, 46(3), pp. 446-458.
- Alonso, B., Moura, J.L., Ibeas, A., y Ruisánchez, F.J. Public transport line assignment model to dual berth bus stops. *Journal of Transportation Engineering (ASCE)*. En revisión desde Febrero de 2010.

ABSTRACT

This thesis deals with the problem of locating stops on public transport systems from two sequentially applied perspectives. The first *strategic* perspective locates all the bus stops throughout the public transport system at a macroscopic scale and the second *tactical* perspective uses the macroscopic solution obtained beforehand to finely adjust the location of stops on a microscopic scale at specific points throughout the city.

The proposed Macroscopic Model is based on a bi-level optimization model made up of an upper level minimizing a function of the overall system costs (Social Cost) and a lower level which includes a modal split assignment model. The model also takes into account the influence of bus stop location, private traffic, road operation and transit vehicle congestion.

In turn, the proposed Microscopic Model is supported by the previous macroscopic model and allows the optimal location for bus stops to be found along an urban corridor whilst trying to maximise the commercial speed of the transit vehicles along this axis.

The validity and usefulness of the proposed models have been checked with their application to a real case: the city of Santander, where the existing system has been optimised by improving the public transport service using fewer resources, increasing the commercial speed by 10% and reducing the fleet needed to do it by 3%. An in-depth sensitivity analysis has also been performed, analysing the behaviour and the relationship between the different variables of the problem.

Finally, part of the research work for this thesis has been published in two articles in noted journals, along with a third currently under review:

- Ibeas, A., Alonso, B., Moura, J.L. and Ruisánchez, F.J. (2009). Using M/M/ ∞ Queueing Model in On-Street Parking Maneuvers. *Journal of Transportation Engineering (ASCE)*, 135(8), pp. 527-535.
- Ibeas, A., dell'Olio, L., Alonso, B. and Sáinz, O. (2010). Optimizing bus stop spacing in Urban Areas. *Transportation Research Part E*, 46(3), pp. 446-458.

- Alonso, B., Moura, J.L., Ibeas, A., and Ruisánchez, F.J. Public transport line assignment model to dual berth bus stops. *Journal of Transportation Engineering (ASCE)*. Under Review since February, 2010.

AGRADECIMIENTOS

Quisiera dedicar estas primeras palabras de gratitud y, especialmente, de afecto, a mis directores de tesis D. José Luis Moura y D. Ángel Ibeas por haberme dado todo su apoyo y confianza a nivel científico, profesional y personal desde el primer día de mi andadura investigadora en el Área de Transportes. Ellos han conseguido que disfrute de mi trabajo en el mundo de la investigación. Sin duda no les puedo considerar solo como mis directores de tesis sino como grandes amigos.

En segundo lugar me gustaría agradecer a mi amigo y compañero el profesor D. Luigi dell'Olio por todo su apoyo y conocimientos que sin duda han contribuido a resolver muchas dudas y a avanzar en esta tesis.

Este trabajo no habría podido realizarse sin la ayuda ni los conocimientos transmitidos por los profesores del Departamento de Transportes de la Pontificia Universidad Católica de Chile D. Juan de Dios Ortúzar, D. Joaquín de Cea, D. Juan Carlos Muñoz y, especialmente, D. Juan Enrique Coeymans. Significó mucho para mí el cariño que me transmitieron durante mi estancia en su departamento.

Mi agradecimiento al CEDEX del Ministerio de Fomento y al Ministerio de Educación y Ciencia por la financiación de los proyectos TRA2006-14663/MODAL y PT-2006-027-06IAPP los cuales han posibilitado la realización de esta tesis.

Gracias también a los Transportes Urbanos de Santander (TUS) y al Excmo. Ayuntamiento de Santander por su colaboración y facilitar toda la información que se ha necesitado.

Quiero agradecer de una manera especial por su colaboración y apoyo a todos mis compañeros y amigos del Grupo de Investigación de Sistemas de Transporte de la Universidad de Cantabria: Patricia, Fran, Olivia, Rosa, Rubén, César, Luis, Alberto, Francesco, Juan Pablo, Rodrigo y Sara, a los profesores D. José María Díaz y D. Ángel Vega y, por supuesto, a Felipe, con el que tengo una deuda de gratitud. No me olvido

de mis compañeros del Grupo Ferrocarriles de la Universidad de Cantabria Roberto y Raúl.

He querido dejar para el final a mis padres (“Cuán grande riqueza es, aun entre los pobres, ser hijo de unos buenos padres”, *Juan Luis Vives*), a mis abuelos, especialmente los que no han podido llegar a ver este momento, a mi hermano Pablo y toda mi familia y amigos (gracias de corazón a todos) y de forma muy especial a mi mujer, Zayra, a quien tengo que agradecer todo su apoyo y comprensión en estos años. Cada página de esta tesis está dedicada a ella.

ÍNDICE

RESUMEN	ii
ABSTRACT	iv
AGRADECIMIENTOS	vi
ÍNDICE	viii
LISTA DE FIGURAS	xii
LISTA DE TABLAS	xviii
CAPÍTULO 0. MOTIVACIÓN Y APORTACIONES.	2
PARTE I: DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.	5
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.	7
CAPÍTULO 2. LAS PARADAS DE AUTOBÚS EN LA CIUDAD.	13
PARTE II: ESTADO DEL ARTE.....	24
CAPÍTULO 3. MODELOS DE LOCALIZACIÓN DE PARADAS DE BUS.	27
CAPÍTULO 4. LA OPTIMIZACIÓN BINIVEL APLICADA AL TRANSPORTE.	37
PARTE III: PROPUESTA DE MODELO MACROSCÓPICO DE OPTIMIZACIÓN BINIVEL DE UBICACIÓN Y ESPACIAMIENTO DE PARADAS DE BUS	64
CAPÍTULO 5. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL MODELO MACROSCÓPICO PROPUESTO.	67
CAPÍTULO 6. NIVEL SUPERIOR: MODELO DE COSTES PROPUESTO.	75

CAPÍTULO 7.	NIVEL INFERIOR: MODELO MACROSCÓPICO DE COMPORTAMIENTO DEL USUARIO.....	85
CAPÍTULO 8.	ALGORITMOS DE RESOLUCIÓN MÁS IMPORTANTES.	107
CAPÍTULO 9.	EJEMPLO DE APLICACIÓN.	123
PARTE IV:	MODELIZACIÓN DE OPERATIVA E INCIDENCIAS EN LA RED A NIVEL MACROSCÓPICO	132
CAPÍTULO 10.	JUSTIFICACIÓN.	135
CAPÍTULO 11.	MODELIZACIÓN DEL CONTROL DEL TRÁFICO.	141
CAPÍTULO 12.	MODELIZACIÓN DE INCIDENCIAS EN LA RED VIAL.....	145
CAPÍTULO 13.	MODELO DE OPERACIÓN DE BUSES EN PARADAS CONGESTIONADAS.	157
CAPÍTULO 14.	MODELO DE ASIGNACIÓN DE LÍNEAS DE TRANSPORTE PÚBLICO A PARADAS DE BUS DIVIDIDAS.	177
CAPÍTULO 15.	EJEMPLO DE APLICACIÓN.	191
PARTE V:	PROPUESTA DE MODELO MICROSCÓPICO DE UBICACIÓN DE PARADAS DE BUS EN EJES URBANOS.....	194
CAPÍTULO 16.	DESCRIPCIÓN DEL MODELO.....	197
CAPÍTULO 17.	DISEÑO DE LOS ESCENARIOS.....	209
CAPÍTULO 18.	EJEMPLO DE APLICACIÓN.	221
PARTE VI:	APLICACIÓN A UN CASO REAL: LA CIUDAD DE SANTANDER	226
CAPÍTULO 19.	DESCRIPCIÓN.	229

CAPÍTULO 20.	UBICACIÓN DE PARADAS DE BUS A NIVEL ESTRATÉGICO: APLICACIÓN DEL MODELO MACROSCÓPICO.	241
CAPÍTULO 21.	UBICACIÓN DE PARADAS DE BUS A NIVEL TÁCTICO: APLICACIÓN DEL MODELO DE MICROSIMULACIÓN.....	259
PARTE VII: CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN..		276
CAPÍTULO 22.	CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN.....	279
REFERENCIAS.		285
ANEXO I.	CONDICIONES DE OPTIMALIDAD DEL PROBLEMA DIAGONALIZADO DE PARTICIÓN MODAL-ASIGNACIÓN.	299
ANEXO II.	DESCRIPCIÓN DE LOS ALGORITMOS DE DIAGONALIZACIÓN Y FRANK- WOLFE.....	303
ANEXO III.	PSEUDOCÓDIGOS.	311

LISTA DE FIGURAS

Fig. 2.1.- Trade-off entre el distanciamiento entre paradas y el tiempo total de viaje (F. Robusté, 2006).	15
Fig. 2.2.- Área de influencia de paradas de autobuses (G.A. Giannopoulos, 1990).....	16
Fig. 4.1.- Conjunto factible del problema relajado y región inducida, ejemplo sin restricciones	46
Fig. 4.2.-Conjunto factible del problema relajado y región inducida, ejemplo con restricciones.	47
Fig. 4.3.- Espacio solución.	49
Fig. 4.4.- Espacio solución con intercambio de rol	51
Fig. 4.5.- Representación grafica de problema de optimización binivel lineal.	55
Fig. 5.1.- Estructura del modelo propuesto.	72
Fig. 6.1.- Estructura de costes	75
Fig. 7.1.- Secciones de Línea entre Dos Nodos (Barquin, 2001).	88
Fig. 7.2.- Arcos de Transporte Público Red (Barquin, 2001).	89
Fig. 7.3.- Ilustración del Árbol de Decisión del Modelo de Demanda (Barquin, 2001)	93
Fig. 8.1.- Diagrama de flujo del algoritmo de solución del problema combinado partición modal-asignación.	110
Fig. 8.2.- Diagrama de flujo del algoritmo de resolución.	113
Fig. 8.3.- Representación de la búsqueda.....	118
Fig. 8.4.- Algoritmo de búsqueda Tabú.	120
Fig. 9.1.- Red ejemplo	123
Fig. 9.2.- Zonificación realizada y discretización de la red.....	124
Fig. 9.3.- Codificación de la red ejemplo en el software ESTRAUS.....	125
Fig. 9.4.- Ubicación inicial de las paradas.	125
Fig. 9.5.- Ubicaciones de paradas de bus en el primer movimiento.....	126
Fig. 9.6.- Ubicaciones de paradas de bus en el segundo movimiento.	126
Fig. 9.7.- Ubicaciones de paradas de bus en el primer movimiento: iteración 2.....	127
Fig. 9.8.- Ubicaciones de paradas de bus en el segundo movimiento: iteración 2.	127

Fig. 9.9.- Ubicaciones de paradas de bus en el primer movimiento: iteración 3.....	127
Fig. 9.10.- Coste Social en función del número de paradas. Comparativa entre HJ y TS.....	130
Fig. 9.11.- Evolución del Coste Social. Comparativa entre HJ y TS.	130
Fig. 10.1.- Eje urbano ejemplo.....	136
Fig. 10.2.- Diagramas espacio-tiempo para cada escenario considerado.	138
Fig. 11.1.- Diagramas espacio-tiempo con coordinación semafórica para transporte privado (F. Robusté, 2006).	142
Fig. 11.2.-Coordinación semafórica para transporte privado y transporte público.	142
Fig. 12.1.- Ubicación de detectores en el tramo con respecto al incidente.	150
Fig. 12.2.- Relaciones flujo-velocidad; flujo-densidad y velocidad-densidad para una sección de dos carriles.	150
Fig. 12.3.- Relaciones flujo-velocidad; flujo-densidad y velocidad-densidad para una sección de tres carriles.	151
Fig. 12.4.- Diagrama simulado de flujo-demora para sucesos.	152
Fig. 12.5.- Velocidad y ocupación para una sección de dos carriles durante la hora de simulación.	153
Fig. 12.6.- Diagrama simulado de flujo-demora para maniobras de estacionamiento.	155
Fig. 13.1.- Etapas en la operación en una parada de bus.....	160
Fig. 13.2.- Parada de bus dividida.....	162
Fig. 13.3.- Capacidad de una parada de bus en áreas suburbanas en función de la operación del semáforo y tiempo de parada (TCQS, 2003).....	169
Fig. 13.4.- Capacidad de una parada de bus en áreas urbanas en función de la operación del semáforo y tiempo de parada (TCQS, 2003).....	169
Fig. 13.5.- Distribución de llegadas de buses. Parada Ayuntamiento.	173
Fig. 13.6.- Microsimulación de la parada del Ayuntamiento.	174
Fig. 13.7.- Ajuste de la microsimulación.	174
Fig. 13.8.- Ajuste con la medición en campo.	175
Fig. 14.1.- Líneas de transporte público de la red ejemplo.	185
Fig. 14.2.- Esquema de división de una parada de bus en la red ejemplo.	187
Fig. 14.3.- Evolución de la función objetivo respecto del número de iteraciones.....	187

Fig. 15.1.- Red ejemplo considerando elementos semafóricos y maniobras de estacionamiento.	191
Fig. 15.2.- Coste social con y sin considerar la operativa e incidencias en la red.....	193
Fig. 16.1.- Diagrama de flujo de la macro diseñada.....	202
Fig. 16.2.- Diagrama de flujo del modelo de cambio de carril.....	204
Fig. 16.3.- Diagrama de flujo del proceso de simulación (<i>fuentes: AIMSUN user's manual</i>)....	205
Fig. 17.1.- Microsimulación de un tramo del eje ejemplo.....	210
Fig. 17.2.- Diagrama espacio-tiempo teórico y simulado de la L1.	211
Fig. 17.3.- Diagrama espacio-tiempo teórico y simulado de la L7.	211
Fig. 17.4.- Diagrama espacio-tiempo teórico de todas las líneas en el eje central.	212
Fig. 17.5.- Diagrama espacio-tiempo simulado de todas las líneas en el eje central.	212
Fig. 17.6.- Diferentes alternativas para una parada antes y después de un semáforo.....	213
Fig. 17.7.- Diferentes alternativas para una parada en una intersección.	214
Fig. 17.8.- Esquema de parada de bus dividida.....	215
Fig. 17.9.- Distribución de llegadas uniforme.....	216
Fig. 17.10.- Distribución de llegadas exponencial.	218
Fig. 18.1.- Ubicación inicial obtenida del modelo macroscópico.	222
Fig. 18.2.- Alternativas de ubicación en cada parada.....	222
Fig. 18.3.- Alternativas de ubicación para las paradas P1 (izda.) y P3.	222
Fig. 18.4.- Velocidad comercial y demoras para cada combinación (iteración) de paradas.	223
Fig. 18.5.- Diagramas espacio-tiempo de la solución óptima (arriba), near-side (vector [2, 1, 2], centro) y far-side (vector [3, 1, 3]).	224
Fig. 19.1.- Metodología seguida a nivel Macro y Micro.....	230
Fig. 19.2.- La ciudad de Santander.....	231
Fig. 19.3.- Distribución de población por zona censal.....	232
Fig. 19.4.- Secciones de la ciudad.....	233
Fig. 19.5.- Perfil transversal A-A'.....	233
Fig. 19.6.- Perfil transversal B-B'.....	233
Fig. 19.7.- Sistema de viario y accesos.	234

Fig. 19.8.- Perfil de tráfico en Santander para día medio laborable.....	235
Fig. 19.9.- Perfil de tráfico por tipo de día.....	235
Fig. 19.10.- Esquema de la red del TUS (fuente: TUS).....	237
Fig. 19.11.- Red vial en ESTRAUS de la ciudad de Santander.....	239
Fig. 19.12.- Líneas TUS codificadas en la red ESTRAUS de Santander.....	239
Fig. 20.1.- Arcos con estacionamientos.....	242
Fig. 20.2.- Asignación de tráfico privado en Santander.....	242
Fig. 20.3.- Ajuste entre flujos asignados y medidos.....	243
Fig. 20.4.- Discretización de la red ESTRAUS de Santander.....	244
Fig. 20.5.- Zonas de igual distanciamiento.....	244
Fig. 20.6.- Ubicación de paradas actual (arriba) y optimizada.....	247
Fig. 20.7.- Evolución de algunas variables utilizando Hooke-Jeeves.....	248
Fig. 20.8.- Evolución de algunas variables utilizando Tabu Search.....	249
Fig. 20.9.- Comparativa de Zonificación inicial en base a población y densidad-actividad.....	250
Fig. 20.10.- Variación del coste social con el número de paradas.....	250
Fig. 20.11.- Variación de viajeros en bus con el número de paradas.....	251
Fig. 20.12.- Variación del tamaño de flota con el número de paradas.....	252
Fig. 20.13.- Relación Coste Social y viajeros en bus con el número de paradas para distintos niveles de demanda.....	254
Fig. 20.14.- Relación Coste Social-viajeros en bus y Coste de usuarios de coche-viajeros en bus para distintos niveles de demanda.....	254
Fig. 20.15.- Variables y costes operacionales para distintos niveles de demanda.....	255
Fig. 20.16.- Costes del operador en función del número de paradas y costes del usuario para distintos niveles de demanda.....	256
Fig. 20.17.- Componentes de la función de coste en función del número de paradas para distintos niveles de demanda.....	256
Fig. 21.1.- Ajuste de aforos.....	260
Fig. 21.2.- Ubicación inicial de paradas del modelo macroscópico en el eje de estudio.....	261
Fig. 21.3.- Codificación del eje de estudio en AIMSUN.....	261
Fig. 21.4.- Alternativas de ubicación a nivel micro para cada parada del eje.....	262

Fig. 21.5.- Ubicación final obtenida del modelo microscópico para cada parada del eje.	266
Fig. 21.6.- Velocidad comercial del bus en cada iteración (vector de paradas) y para distintos tipos de llegada de pasajeros a las paradas.....	267
Fig. 21.7.- Diagramas espacio-tiempo para la mejor ubicación (arriba) y peor ubicación final.	268
Fig. 21.8.- Velocidad comercial para demanda de tráfico alta.....	270
Fig. 21.9.- Velocidad comercial para demanda de tráfico media.....	270
Fig. 21.10.- Velocidad comercial para demanda de tráfico baja.....	271
Fig. 21.11.- Velocidad de bus para cada combinación de demanda y ciclo.....	273
Fig. 21.12.- Velocidad comercial por tipología de parada para diferentes niveles de demanda de tráfico.	273
Fig. 21.13.- Velocidad comercial por tipología de parada para diferentes niveles de demanda de buses.....	274
Fig. 21.14.- Ubicación para cada caso según el ciclo semafórico.....	274

LISTA DE TABLAS

Tabla 4.1.- Comparativa de soluciones de los ejemplos y del equilibrio de Nash	52
Tabla 9.1.- Matriz O/D para la red ejemplo.	124
Tabla 9.2.- Líneas de transporte público en la red ejemplo.....	124
Tabla 9.3.- Iteraciones Hooke-Jeeves.....	128
Tabla 9.4.- Iteraciones Tabu Search.....	129
Tabla 10.1.- Ubicación de paradas y semáforos en el eje.	136
Tabla 12.1.- Flujo y demoras para diferentes sucesos obtenidos de la microsimulación.....	152
Tabla 12.2.- Tiempo de viaje para diferente número de maniobras de estacionamiento.	154
Tabla 13.1.- Capacidades prácticas de paradas de bus. (Gibson y Fernandez, 1995)	167
Tabla 13.2.- Eficiencia según el número de sitios en una parada (TCQS, 2003).....	170
Tabla 13.3.- Capacidad de una parada según el número de sitios, operación del semáforo y tiempo de parada del bus (TCQS, 2003).	170
Tabla 14.1.- Matriz O/D de transporte público.	186
Tabla 14.2.- Valores de las variables usadas en la aplicación.....	186
Tabla 14.3.- Soluciones finales.	188
Tabla 14.4.- Comparativa entre distintas distribuciones de líneas a paradas de bus.....	189
Tabla 15.1.- Iteraciones TS considerando operativa e incidencias en la red.....	192
Tabla 17.1.- Porcentaje de capacidad básica de una parada (Gibson, 1996).....	213
Tabla 17.2.- Demoras para paradas near-side y far-side (Furth y San Clemente, 2006).....	215
Tabla 19.1.- Líneas del TUS.	236
Tabla 20.1.- Ajuste para el TUS.....	243
Tabla 20.2.- Valores del tiempo y costes unitarios utilizados.	245
Tabla 20.3.- Resultados de la aplicación a Santander- Comparativa entre la situación actual y la optimizada.	246
Tabla 20.4.- Soluciones iniciales analizadas y zonificaciones empleadas.	248

Tabla 20.5.- Resultados finales para distintos niveles de demanda.	253
Tabla 20.6.- Resultados finales para distintos niveles de demanda.	253
Tabla 21.1.- Vectores para cada número de iteración.	264
Tabla 21.2.- Velocidades comerciales para diferentes ubicaciones de paradas, demandas y ciclos semafóricos.	272

Capítulo 0

MOTIVACIÓN Y APORTACIONES



CAPÍTULO 0. MOTIVACIÓN Y APORTACIONES.

Tradicionalmente se ha considerado el diseño físico y operacional de un sistema de transporte urbano como un problema donde se ha dotado de gran relevancia al trazado de las líneas, determinación de frecuencias y tamaño de flota necesario y/o disponible. Sin embargo, la ubicación de las paradas se ha basado, especialmente en Europa, en criterios establecidos a partir de la experiencia, fundamentalmente focalizados a satisfacer las restricciones de espacio o a minimizar la interacción con el tráfico privado. Es evidente que dentro de una gestión eficiente de los recursos, resulta primordial el correcto diseño de estas características, pero no es menos cierto que, a la hora de implantar un sistema de transporte público en una ciudad, o modificar uno existente, la ubicación de las paradas de bus cobra una especial relevancia. Tal es así que en ciudades de tamaño medio o grande la complejidad de la red puede ser la suficiente para que el uso de criterios prácticos simples de localización de paradas de autobús no sea útil para obtener una cobertura eficiente del sistema.

A lo largo de esta tesis se trata este problema que ha motivado interesantes investigaciones. En concreto, el modelo que aquí se propone es de aplicación para toda la red de transporte público en un área urbana teniendo en cuenta todos los origen/destino de la ciudad (nivel macroscópico) y considerando la congestión en la red



vial, buses y paradas, complementado con un enfoque a nivel microscópico de refinamiento de las soluciones dadas por el nivel macroscópico.

Las aportaciones más significativas de esta tesis son las siguientes:

1. El modelo propuesto aborda el problema de localización de paradas de bus desde una escala macroscópica para después afinar la solución final a escala microscópica. Este enfoque combinado no ha sido realizado hasta ahora.
2. El modelo a nivel macroscópico puede aplicarse a toda la red de transporte público de un área urbana o interurbana.
3. Se realiza un análisis de sensibilidad en función del nivel de demanda y la congestión del sistema que permite establecer diferentes relaciones entre las variables del sistema.
4. El modelo propuesto considera la congestión en la red vial, en los vehículos de transporte público y en las paradas de bus.
5. Se propone un modelo de operación de buses en paradas congestionadas.
6. Se plantea un modelo de asignación de líneas de transporte público a paradas de bus divididas, evitando la planificación subjetiva que suele hacerse en estos casos.
7. Se permite la modelización de variables operacionales e incidentes de la red vial como las maniobras de estacionamiento, semáforos y operación en paradas de bus de tal manera que pueden influir en los costes de viaje y operacionales.
8. El enfoque utilizado permite modelar una gran cantidad de restricciones físicas y operacionales relativas a la localización de las paradas y al operador del transporte público sin comprometer la complejidad computacional del modelo.
9. Se estudia a nivel microscópico la ubicación de paradas de bus tratadas conjuntamente en el análisis de un eje completo, no de manera individual como suele ser común en investigaciones referentes a este tema.

PARTE I: DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN



CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.

1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.

La accesibilidad al transporte público a través de la configuración espacial de las paradas de bus es un importante factor que incide fuertemente en la elección de dicho modo por parte de los usuarios. Cuando la distancia entre paradas aumenta, la distancia a pie desde/hacia las paradas se incrementa, pero al mismo tiempo los autobuses tienen que detenerse en menos paradas, con lo que el tiempo de viaje en el vehículo disminuye. Por contra si la distancia entre paradas disminuye, el tiempo de acceso se reduce también, pero los autobuses tienen que detenerse en más paradas y por lo tanto, el tiempo de viaje en el vehículo aumenta, influyendo a su vez en el tamaño de flota y las frecuencias del sistema.

Por todo ello el tener una distribución coherente y racional de las paradas a lo largo de la red de transporte público se antoja como una etapa importante y que no debe ser relegada al último lugar en la planificación de sistemas de transporte público.

Por otro lado, desde el punto de vista de la operación de un sistema de transporte público, la velocidad de servicio del sistema junto con la velocidad comercial son fundamentales para valorar su eficiencia y competitividad frente al automóvil. Las



principales causas de demoras en los servicios de transporte público con vía no reservada son la propia congestión existente en la red vial, las intersecciones semaforizadas o no prioritarias y las detenciones en las paradas de autobús para la subida/bajada de viajeros. De hecho, el Manual de Capacidad y Calidad del Servicio de Transporte Público Norteamericano (TCQS (TRB, 2003)) establece que la capacidad de un corredor de transporte público está dada por el elemento de menor capacidad, siendo en la mayoría de ocasiones las paradas de bus.

Por lo tanto, resulta muy interesante conocer la interacción de la operación del transporte público con la distribución de las paradas en la red y con el vehículo privado dentro de una ciudad. Para ello se hace necesario tener en cuenta parámetros operativos e incidencias en la red vial como puedan ser maniobras de estacionamiento, vehículos en doble fila o el control semafórico.

1.2. OBJETIVOS.

Dentro de toda la problemática del Diseño de Sistemas de Transporte Urbano (DSTU), el objetivo general de esta tesis es proponer, desarrollar, analizar e implementar una metodología que permita localizar las paradas de buses en áreas urbanas a nivel estratégico (escala macroscópica) y nivel táctico (escala microscópica) considerando incidencias y la operativa de la red (tanto vial como de transporte público).

Desde este objetivo general derivan una serie de objetivos específicos, muchos de los cuales se han ido planteando a lo largo de esta investigación como consecuencia de los resultados experimentales obtenidos.

En concreto, en el bloque estratégico (nivel macro) los principales objetivos perseguidos son:

- Analizar las principales investigaciones acerca de la localización de paradas de buses.
- Obtener el espaciamiento óptimo de paradas y su ubicación, en una red completa de transporte público, adecuándose a las características sociodemográficas de cada zona de la ciudad, modelizando el reparto modal para obtener los cambios



en las elecciones de los viajeros debido a la nueva configuración del sistema de transporte público obtenida.

- Estudiar e implementar los posibles algoritmos de solución necesarios para resolver dichos modelos.
- Realizar un análisis de sensibilidad para analizar la influencia que tiene sobre los resultados el hecho de considerar distintos grados de agregación de las zonas de igual distanciamiento de paradas, diferentes soluciones iniciales factibles, restricciones operacionales, niveles de demanda, etc.

En lo que se refiere al bloque táctico (nivel micro), los objetivos buscados son:

- Localización microscópica final de las paradas de bus en ejes urbanos completos.
- Analizar las principales directrices (criterios prácticos) e investigaciones acerca de la localización de paradas de autobuses para así poder modelizar dichas recomendaciones y comparar los resultados obtenidos.
- Analizar la influencia de dicha localización final en diversos parámetros operacionales como puedan ser los intervalos de paso, la velocidad comercial, demoras.
- Realizar un análisis de sensibilidad de la influencia de los parámetros de control del tráfico, intensidad de circulación y número de buses sobre la ubicación final obtenida.

1.3. ESTRUCTURA

La presente tesis se estructura en siete partes a lo largo de las cuales se va exponiendo el problema, el estado del arte sobre investigaciones con la misma temática y de las herramientas para la resolución del problema planteado en la tesis, el modelo propuesto tanto a nivel macroscópico como a nivel microscópico, una aplicación a un caso real y una última parte donde se exponen las principales conclusiones extraídas de esta investigación y las futuras líneas de desarrollo.



Cada parte de la tesis está dividida en varios capítulos, conformando un total de 22, a lo largo de los cuales se intenta unir conocimientos teóricos y prácticos con el objeto de formular un modelo de localización de paradas mediante la optimización de las operaciones del sistema de transporte público urbano.

El presente capítulo describe los objetivos de la tesis y en el capítulo anterior las aportaciones que ésta proporciona al estado del conocimiento. El segundo capítulo es una introducción a la problemática actual de la ubicación de las paradas de bus en las ciudades, realizando una exposición de criterios y pautas que actualmente se siguen en alguna de ellas. Estos dos primeros capítulos forman la *Parte I* de esta tesis.

La *Parte II* también está compuesta de dos capítulos dedicados a revisar el estado del arte del problema a tratar.

En el capítulo tercero se hace una revisión del estado del arte de los modelos de localización de paradas de bus, diferenciando las investigaciones a escala macroscópica y microscópica, apreciando la diferenciación entre los diferentes enfoques utilizados para la modelización. El capítulo cuarto expone los conceptos básicos de la optimización binivel, detallando algunas aplicaciones en el campo del Transporte.

Una vez descritos el problema a resolver, el estado del arte hasta la fecha y las herramientas para su resolución, la *Parte III* está dedicada íntegramente a exponer el modelo macroscópico de optimización binivel a lo largo de cinco capítulos.

En el capítulo quinto se describe el modelo a utilizar para ya en el capítulo sexto plantear el problema de optimización del nivel superior y en el capítulo séptimo el problema de optimización del nivel inferior. Posteriormente, el capítulo octavo describe los diferentes algoritmos empleados para la resolución de todo el modelo macroscópico. Finalmente, en el capítulo noveno se explica con un ejemplo la aplicación práctica del modelo.

La *Parte IV* consta de seis capítulos en los que se entra ya a analizar y estudiar la influencia en el modelo propuesto de las incidencias y operativa, tanto de la red vial como del transporte público.



En el capítulo décimo se expone la justificación de la consideración de la operativa e incidencias en la red en el modelo propuesto. En el capítulo undécimo se plantea un modelo de demora en nodos semafóricos. En el duodécimo se analiza la influencia de incidencias en la red vial en la capacidad y demoras en viales. El capítulo decimotercero expone la problemática de la congestión en las paradas de bus y su influencia en la operación en el transporte público. En el capítulo decimocuarto se plantea un modelo de asignación de buses a paradas de bus congestionadas que se han tenido que dividir en dos áreas de parada, empleando también para ello la optimización binivel. Finalmente, en el capítulo decimoquinto se vuelve a aplicar el modelo macroscópico a la misma red ejemplo que en el capítulo noveno pero considerando ahora todo lo expuesto en esta Parte IV de la tesis, comparando los resultados.

La *Parte V* de la tesis está dedicada a exponer un modelo microscópico de ubicación de paradas de bus a partir de la solución del modelo macroscópico, y está compuesta por tres capítulos.

En el capítulo decimosexto se describe el modelo de ubicación de paradas de bus. El capítulo decimoséptimo, por su parte, define los escenarios a considerar en las simulaciones y en el capítulo decimoctavo se explica con un ejemplo la aplicación del modelo.

En la *Parte VI*, compuesta por los capítulos decimonoveno, vigésimo y vigesimoprimeros se expone una aplicación práctica de los modelos macro y micro a la ciudad de Santander. Asimismo se analizan los datos obtenidos y se realiza un análisis de sensibilidad.

Finalmente, la *Parte VII*, compuesta por el capítulo vigesimosegundo, recoge las conclusiones finales sobre el trabajo realizado y se proponen las futuras líneas de investigación.

CAPÍTULO 2
LAS PARADAS DE AUTOBÚS EN LA CIUDAD



CAPÍTULO 2. LAS PARADAS DE AUTOBÚS EN LA CIUDAD.

2.1. LAS PARADAS DE AUTOBÚS Y LA ACCESIBILIDAD AL TRANSPORTE PÚBLICO EN ÁREAS URBANAS.

El objetivo de todo plan de transporte público es el de transportar a las personas evitando así que éstas se desplacen en sus vehículos privados produciendo los aumentos de congestión y sus externalidades. Por lo tanto, si se quiere facilitar el uso del transporte público, la accesibilidad al mismo será sin duda uno de los aspectos críticos.

La accesibilidad es el grado de la facilidad en que es posible para los usuarios alcanzar el sistema de transporte público. Involucra el problema de la distancia y tiempo tomado para cubrir la parte del viaje entre el origen y la llegada del vehículo a la parada, requiriendo la consideración de aspectos físicos como los pasos de peatones, las pendientes, etc. también incluye las percepciones de las dificultades involucradas en esta parte del viaje: el riesgo, intimidación, la incomodidad, etc. además, la información sobre el viaje antes de las salidas del viaje debe ser considerada en la accesibilidad (Tyler, 1996).

Describiendo un viaje puerta a puerta en transporte público, se pueden definir varias etapas (Frye, 1996; Brown, 1996):



- i. El trayecto desde el origen del viaje hasta la parada de transporte público.
- ii. La espera en la parada hasta abordar la línea deseada.
- iii. El tiempo de subida al vehículo.
- iv. El tiempo de viaje en vehículo hasta la parada de destino.
- v. El tiempo de bajada del vehículo.
- vi. El trayecto desde la parada hasta el destino final del viaje.

De todas las etapas descritas, es evidente que i y vi están claramente influenciadas por la ubicación de las paradas en la trama urbana. ii, iii y v están influidas por aspectos operacionales como por la monética, características de los vehículos (nº de puertas para subir y bajar, nº de validadores, etc.) pero también por la demanda en la parada, que a su vez está condicionada por su ubicación. Finalmente, iv dependerá de la velocidad del vehículo en movimiento más los tiempos perdidos por detenciones debidas al tráfico y los tiempos en el resto de paradas intermedias.

Queda aquí demostrado que la ubicación y el número de paradas existentes en un trayecto influye en todas y cada una de las etapas del viaje a realizar.

Así, se puede definir el distanciamiento entre paradas de transporte público como el número de paradas por longitud de tramo de una línea o la distancia media entre paradas. Esta es una variable muy importante que, como se ha visto, afecta las distancias medias a pié de pasajeros para llegar a las líneas, además de que en la operación de la línea influyen también los tiempos de viajes, espera, etc.

Cuando la distancia entre paradas aumenta, la distancia a pié desde/hacia las paradas aumenta, pero al mismo tiempo los autobuses tienen que detenerse en menos paradas. Por lo tanto el tiempo total de viaje, incluyendo el tiempo a pié, puede aumentar. Por contra si la distancia entre paradas disminuye, el tiempo de caminata disminuye también, pero los autobuses tienen que detenerse en más paradas y por lo tanto, el tiempo total de viaje puede seguir aumentando.

Este trade-off entre el distanciamiento entre paradas y el tiempo total de viaje está representado gráficamente en la figura 2.1. Evidentemente el objetivo final es fijar el distanciamiento óptimo entre paradas de autobús, a lo largo de cierta línea de la red, de manera que el tiempo total de viaje esté alrededor del mínimo mostrado en la figura 2.1.

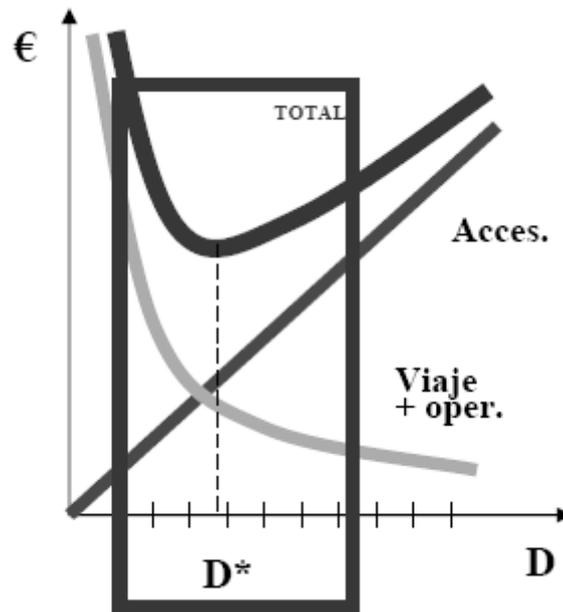


Fig. 2.1.- Trade-off entre el distanciamiento entre paradas y el tiempo total de viaje (F. Robusté, 2006).

Por "Cubrimiento total de la zona", se entiende el área de espacio urbano que se encuentra dentro de la distancia a pie aceptable hasta las paradas de autobús. Este "Cubrimiento" o "Área de influencia" para cada parada de autobús se representan por un contorno alrededor de ellas, (define por ejemplo una distancia a pié de 400 metros en la red de calle existentes). Estos contornos pueden ser aproximadamente representados por círculos de un radio apropiado dependiendo de la densidad y de la forma de la red a estudio (figura 2.2.).

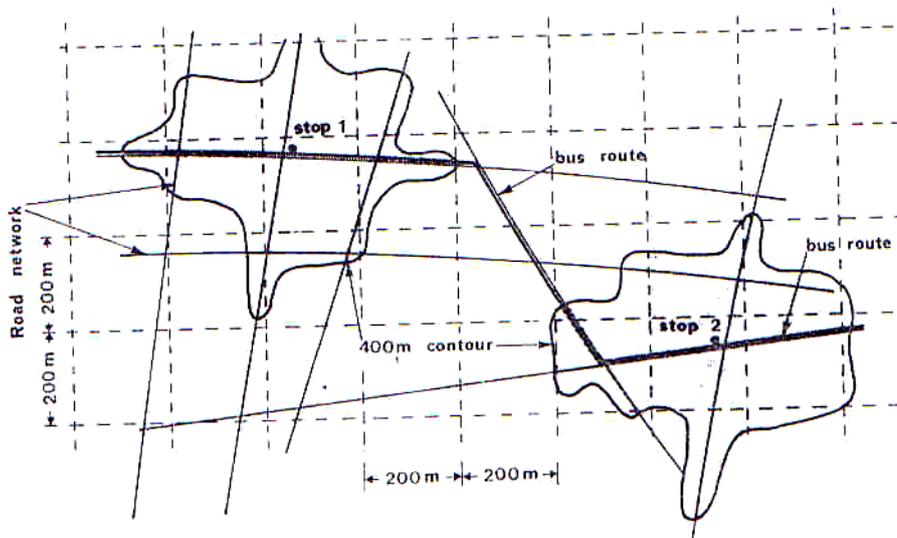


Fig. 2.2.- Área de influencia de paradas de autobuses (G.A. Giannopoulos, 1990).

2.2. EJEMPLOS DE CRITERIOS APLICADOS.

Los criterios para determinar la posición de una parada de autobús y por lo tanto su distanciamiento, se relacionan también con el tipo y la densidad de los usos del suelo alrededor de las líneas de transporte público colectivo urbano por carretera. Se exponen a continuación algunos criterios generales para determinar la posición de paradas de autobús:

1. La selección de un posible candidato a punto de parada inicial, puede ser un punto con una concentración muy importante de potenciales viajeros, como shopping centres, hospitales, colegios etc. También cerca de puntos donde dos o más líneas se cruzan, o cerca de un parking para favorecer el park and ride.
2. Como segunda consideración, los efectos de tráfico en la parada propuesta deben ser revisados, especialmente si la parada está ubicada en el centro urbano.
3. Si ambas condiciones previas han sido satisfechas, se deben tener en cuenta las distancias a pie de esta parada de autobús y las de las otras paradas en relación al tiempo de viaje (ver también figura 2.1).



Aunque las cifras de distanciamiento óptimo entre paradas de autobús específicas no pueden ser definitivas e inflexibles, se pueden dar algunas indicaciones generales sobre las distancias medias entre ellas.

Muchos expertos sugieren que dichas distancias medias, sobre la base de la experiencia existente, sean las siguientes (Roads Service, 2005):

1. Desde 150 - 250 metros para el centro urbano o áreas con altas densidad de población.
2. Desde 200 - 350 metros para áreas de media densidad de población (por ejemplo alrededor de 2000 Personas por km²), y
3. Desde 250 - 500 metros en áreas suburbanas y de baja densidad.

Así, por ejemplo, la Confederation of British Road Passenger Transport (1981) establecía que, en las áreas residenciales, las paradas de bus debían ubicarse teniendo en cuenta las distancias a pie de los viajeros, debiendo ser ésta menor de 400 metros, que implicaría unos 5 minutos de recorrido, a una velocidad de 1,3 m/sg (5 km/hora). Lesley (1976) establecía una densidad de 2 o 3 paradas por km atendiendo a una velocidad comercial deseable del transporte público. En Holanda, los espaciamientos medios oscilan de los 375 a los 450 metros.

La Canadian Urban Transyt Association (1985) propone que la mínima distancia entre paradas debe ser entre 180 y 200 metros y la máxima entre 300 y 400 metros. En observaciones realizadas en varias ciudades canadienses, los espaciamientos medios entre paradas comprendían entre 197 y 254 metros. Por su parte, Pretty y Russell (1988) recomiendan un rango de espaciamiento de 200 a 400 metros, teniendo en cuenta los tiempos de pérdida en aceleración y frenado de los vehículos en cada parada.

Otros criterios, por ejemplo en Brasil, tienen en cuenta el uso del suelo y la densidad de las áreas residenciales para establecer un espaciamiento de 300-500 metros para las zonas de baja densidad y 150-300 metros en el CBD (Central Bussines Districts). Otras prácticas en América del Sur están fuertemente condicionadas a la fuerte demanda. Así, en Perú el rango del espaciamiento entre paradas varía entre los 50 y los 200 metros. En



Chile se sigue un criterio similar al brasileño, estableciéndose una parada cada 100-200 metros en el CBD.

En España existen criterios similares a los expuestos. En Sevilla existe un promedio de 300 metros entre cada parada, en Barcelona el rango ha oscilado de 350 a 490 metros, en Vitoria el nuevo plan de Transporte Urbano ubica una parada cada 350-400 metros, mientras que en Valencia esta distancia se reduce a 260 metros.

Entonces, habiendo determinado, en líneas generales, la localización de una parada, su ubicación final también dependerá de las características de operación del resto del sistema, y por lo tanto, deben tenerse en cuenta asimismo, los tiempos de espera y recorrido en buses, el tráfico de vehículos privados en la red, la seguridad de peatones y pasajeros, etc.

Además, la ubicación de una parada de autobús depende de otros factores que deben ser considerados en la elección final de su punto exacto. Estos factores son los que siguen (Roads Service, 2005):

1. La parada debe ser visible, especialmente a los autobuses que se acercan a ella; la visibilidad no debe de ser obstruida por árboles, edificios u obstáculos varios.
2. Por la noche la parada de autobús debe estar apropiadamente iluminada.
3. Es preferible que la parada de autobús no esté exactamente ubicada enfrente de la de la dirección contraria. Generalmente, es recomendable que las paradas de autobús de los dos sentidos de la misma calle tengan una separación horizontal de al menos 35 metros.
4. La pendiente longitudinal de la calle en la sección alrededor de la parada de autobús, no debe ser más grande del 4 %, para evitar problemas a los autobuses a la hora de dejar la parada en las maniobras de arranque y disminuir los niveles de ruido etc.
5. Cuando los autobuses tienen que girar a la izquierda después de la parada, la ubicación de ella debe situarse al menos a 50 metros del punto de giro. Esta



distancia debe ser incrementada a 75 o incluso 100 m si hay intensidades tráfico elevadas. En caso de un giro a la derecha la distancia mínima es 35 metros.

6. Si hay un uso del suelo específico como una escuela o un hospital en la zona, la parada debe ubicarse lo más cerca posible de estas estructuras.

Particularmente importante es la *ubicación de paradas respecto a las intersecciones viales*. Se mencionan 3 tipos de paradas:

1. Paradas tipo "Near side", se localizan antes de la intersección.
2. Paradas tipo "Far side", se localizan después de la intersección.
3. Paradas tipo "mid-block", se localizan en el medio de la manzana.

Las ventajas y desventajas relacionadas con la utilización de estos tipos de paradas en los casos citados se pueden extraer del Transit Capacity and Quality of Service Manual, (TRB, 2003).

Las paradas de autobús tipo *Near Side* se ubican antes de las intersecciones donde los flujos vehiculares son intensos pero las condiciones de tráfico y de estacionamiento no son críticas. Desde el punto de vista del conductor esta ubicación es preferible ya que facilita la reintroducción del autobús en la corriente de tráfico. Se utilizan generalmente donde las intersecciones señalizadas son frecuentes y donde el estacionamiento se permite durante todo el día. Los autobuses que se detienen en estos tipos de paradas pueden utilizar la distancia desde la intersección para volver a entrar en la circulación de tráfico principal. Las paradas de autobús tipo *Near Side* pueden ser ubicadas donde los autobuses giran a la derecha y donde los giros a este lado no son apreciables.

Las *ventajas* de las paradas tipo *Near Side*:

1. Producen muy baja interferencia en sitios donde el tráfico es más intenso después de la intersección que antes de la intersección.
2. Los pasajeros en general pueden subirse al autobús cerca de un cruce peatonal.
3. Los buses tienen que parar en un punto cerca de una intersección. Por ello, a la hora de cruzarla lo realizan a velocidad limitada. Por lo tanto las bajas



velocidades alcanzadas reducen el riesgo de accidentes con otros vehículos y de atropellos de peatones.

4. El conductor del autobús puede ver más claramente a los pasajeros que se acercan a la parada tipo *Near Side*, incluso los que están cruzando la calle en los pasos de peatones. De esta manera los peatones no se retraen a cruzar la calle en condiciones de peligro para llegar a tomar el autobús.

Las *desventajas* de la parada tipo *Near Side*:

1. En el caso en que exista un número elevado de giros a la derecha se pueden crear conflictos en la circulación cuando un vehículo intenta girar a la derecha mientras el autobús está parado.
2. Los buses perjudican la visibilidad de las señales de stop, de señales de tránsito u otros dispositivos de control, y también pueden ocultar a los peatones que están cruzando la calle.
3. Un autobús que está en una parada tipo *Near Side* cubre la distancia de visibilidad de un conductor que accede en la calle donde se encuentra el autobús desde la derecha.

Las paradas de autobús tipo *Far Side* son preferibles donde existan problemas relativos a la distancia de visibilidad o donde los giros a la derecha o izquierda son problemáticos a causa de las altas intensidades de tráfico. Son también preferibles donde los autobuses giran a la izquierda, porque la distancia de maniobra es suficiente entre bordillo y carriles izquierdos y los autobuses se detienen después de dejar libre la intersección.

Las *ventajas* de paradas de autobús tipo *Far Side*:

1. Reducen los conflictos entre vehículos que giran a la derecha y autobuses parados.
2. Permiten aumentar la capacidad de la intersección
3. Eliminan las deficiencias de distancia de visibilidad cerca de la intersección. En modo particular mejoran la visibilidad del peatón que está cruzando.



4. Logran que el peatón cruce por la parte trasera del autobús.
5. Requieren distancias de maniobra de entrada y salida de la parada más breves.
6. En el caso de intersecciones señalizadas los autobuses pueden encontrar huecos para el reingreso en la corriente de tráfico cuando los semáforos están en rojo.

Las *desventajas* de paradas tipo *Far Side*:

1. La parada en una calle estrecha o que ocupa un carril (no existe bahía), puede bloquear el tráfico tanto en el carril donde se encuentra el autobús como el cruce.
2. Donde la parada de autobús es demasiado pequeña para las grandes demandas ocasionales, se puede crear una cola de autobuses que quieren entrar en dicha parada hasta llegar a obstruir el propio cruce.

Las paradas *Mid Block* son en general aplicables en las áreas céntricas, donde las rutas múltiples que pasan por la misma parada requieren áreas de carga largas. También pueden ser usados donde el tráfico, las condiciones físicas o ambientales impiden el uso de paradas tipo *Near Side* o *Far Side* y donde existen grandes fabricas, establecimientos comerciales y otros puntos generadores importantes:

Las ventajas de paradas de autobús tipo *Mid Block* incluyen lo siguiente:

1. los autobuses generan una mejora sustancial de la visibilidad tanto de vehículos como de peatones.
2. Si hay muchos pasajeros esperando estos se pueden distribuir sobre la acera a ambos lados de la parada.

Las *desventajas* incluyen lo siguiente:

1. Requiere la eliminación del espacio potencial disponible para los aparcamientos.
2. Los usuarios que llegan desde las intersecciones tendrán que caminar más para llegar a la parada.



3. Se pueden generar accidentes de peatones que cruzan la calle, aumentan las maniobras de frenadas y arranque y es más alta la probabilidad de accidente.

PARTE II: ESTADO DEL ARTE

Capítulo 3

MODELOS DE LOCALIZACIÓN DE PARADAS DE BUS



CAPÍTULO 3. MODELOS DE LOCALIZACIÓN DE PARADAS DE BUS.

3.1. INTRODUCCIÓN.

En este capítulo se realiza una revisión bibliográfica de trabajos previos en los que se trata el tema de la ubicación y/o espaciamiento de paradas de bus en ámbitos urbanos, así como de su operativa dentro del sistema de transporte público. Dicha revisión se estructura en dos bloques atendiendo a la escala de trabajo y a la finalidad del mismo.

Así, se han querido separar los trabajos en aquellos realizados a escala macroscópica, bien mediante empleo de modelo analíticos o de simulación, y aquellos realizados a escala microscópica, los cuales se centran más en la operativa de la parada de autobús y de la red vial de su área de influencia.

3.2. MODELOS DE UBICACIÓN DE PARADAS A NIVEL MACROSCÓPICO.

Como se ha expuesto anteriormente, pueden considerarse a grandes rasgos dos tipos de enfoque en cuanto a la utilización de modelos:

- Optimización (modelos analíticos y modelos de red);
- Simulación.



Los dos enfoques difieren por las particularidades con que viene modelizada la interacción entre las estrategias del gestor y del usuario.

En el enfoque de *optimización* las soluciones (diseño y/o configuración de la oferta) son generadas a través de un modelo y analizadas y evaluadas mediante procesos generalmente iterativos.

En el enfoque de *simulación* se definen múltiples diseños y/o configuraciones de la oferta sobre la base de la experiencia del planificador las cuales se analizan y se evalúan a través de diferentes modelizaciones.

La generación de las soluciones del problema de optimización se hace a través de dos tipologías de modelos:

1. *Modelos analíticos*, caracterizados por esquematizaciones idealizadas del área de estudio y los sistemas de transporte colectivo.
2. *Modelos de red*, que utilizan todas las potencialidades ofrecidas por la teoría de grafos con la ayuda de procedimientos heurísticos, optimizando todas o algunas de las variables de explotación como por ejemplo, trazados de las líneas, frecuencias de servicio, horarios, topología de vehículos, etc.

Las líneas de investigación en el ámbito de la simulación consideran además de la simulación estática (verificación de capacidad), una simulación interactiva basada en la comparación de varias hipótesis de configuración de red (Di Gangi y Montella, 1995).

Bajo estos enfoques se han desarrollado numerosos trabajos orientados a la optimización de itinerarios (Ceder y Wilson, 1986; Russo et al., 1999; etc.), frecuencias (Ceder, 1984; LeBlanc, 1988; etc.), tamaño de flota y tipología de vehículo (Jansson, 1980; Vijakamur, 1986; Glaister, 1986; dell'Olio et al., 2006; etc.) en sistemas de Transporte Público, por poner unos ejemplos.

Sin embargo, en lo que respecta al espaciamiento y ubicación óptima de paradas se encuentran menos trabajos publicados, diferenciándose además orientaciones específicas de los trabajos: así, mientras los trabajos hasta las décadas de los 60 y 70 estaban más orientados al ferrocarril, en los años posteriores se centran más en el



transporte en bus para, ya posteriormente, estudiar en detalle los corredores de transporte público de BRT o LRT.

Un ejemplo de esto es el trabajo de Vuchic y Newell (1968) que desarrollan un modelo orientado a casos en los que la demanda se desplaza a una zona central fija en el que se minimiza el tiempo de viaje, siendo éste función del número y la localización de las estaciones. Overgaard (1965) intenta encontrar la localización óptima de las estaciones con el objetivo de maximizar el número de pasajeros que escogen el rapid transit sobre el automóvil bajo la hipótesis del mínimo tiempo de viaje, aplicado a una red radial. Kraft y Boardman (1972) estudian los efectos de desplazar las paradas de autobús desde una localización *nearside* a *farside*, aunque sus estudios miran más a los efectos de la localización sobre el tráfico privado, algo similar al estudio de Rasanen (2006). Posteriormente Gleason (1973) resuelve un problema de *Set Covering* para localizar el menor número posible de paradas de autobuses y propone un modelo de programación entera que minimiza la distancia total de caminata de los viajeros del sistema, o bien ésta no supera un determinado valor. Lesley (1976) desarrolla un modelo aplicado a una sola ruta de transporte urbano en bus para optimizar el espaciamiento de paradas separado en dos criterios: costes generalizados de los pasajeros y costes comunes (pasajeros y operador) totales, estableciendo separaciones que van desde 50 metros para las horas punta y hasta 200 metros para las horas fuera de punta.

En la década de los 80, Wirasinghe (1980) y Kuah y Perl (1988) optimizan el distanciamiento entre líneas y paradas y los intervalos entre autobuses, considerando los costes de viaje y los costes operacionales. Wrasinghe y Ghoneim (1981) obtienen el espaciamiento entre paradas de bus para una sola ruta de transporte público considerando demanda *many to many* no uniforme. Demetsky y Lin (1982) identifican los elementos asociados al problema de localización y diseño de paradas de autobuses utilizando dos cuestionarios para conocer la opinión al respecto de ingenieros de tráfico y operadores de transporte. Ceder et al. (1983) proponen un modelo de minimización del número de paradas de autobuses, teniendo en cuenta el hecho de que ningún usuario del transporte público se quede fuera de una distancia prefijada desde la parada de autobús. Ghoneim y Wrasinghe (1987) proponen un modelo de optimización de los costes totales del sistema, para optimizar el distanciamiento entre paradas, la frecuencia y la longitud de las líneas



Ya en la década de los 90, Fernandez (1993) aplica un sistema experto para la localización de paradas de buses de alta capacidad; Fitzpatrick et al. (1997) llevan a cabo encuestas, observan la localización de las paradas existentes y usan simulación computacional para estudiar los efectos de la localización de las paradas sobre las operaciones de tráfico.

Van Nes (2000) y Van Nes y Bovy (2000) centran su investigación en el diseño de las variables fundamentales (espaciamiento entre paradas y líneas de bus) en el diseño de redes de transporte público y en la influencia de los objetivos en los valores de diseño resultante, teniendo en cuenta las preferencias del viajero y las limitaciones presupuestarias. De este modo, desde tres puntos de vista distintos (viajeros, operador y autoridades locales) obtienen varias funciones objetivo que pueden utilizarse para el diseño con demanda fija, llegando a la conclusión de que minimizar los costes totales es el objetivo más realista para abordar el problema de diseño de la red de transporte público. En ese mismo año, Furth y Rahbee (2000) modelizan el impacto de la modificación del espaciamiento entre paradas de bus en la línea de transporte público correspondiente. Para ello emplean un modelo geográfico para distribuir la demanda, y un algoritmo de programación dinámica para encontrar el espaciamiento óptimo entre paradas de una línea de bus, aplicándolo a una línea de la ciudad de Boston, en la que se pasa de 200 a 400 metros de distancia entre paradas. Saka (2001) propone un modelo que determina el espaciamiento óptimo de las paradas mediante una descomposición detallada de los tiempos de viaje del bus en la que tiene en cuenta el tiempo debido a la detención en las paradas, aceleración y deceleración, etc. para, posteriormente, realizar un análisis de sensibilidad de la variación del espaciamiento entre paradas y su influencia en la frecuencia, encontrando así el óptimo. Sankar et al. (2003) aplican un análisis multicriterio usando GIS para considerar posibles localizaciones de paradas de bus teniendo en cuenta varios parámetros como la distancia, importancia de la localización, disposición a caminar del usuario, e intersecciones, aplicado a un trayecto en una ciudad en India. Chien y Qin (2004) desarrollan un modelo aplicado a una ruta de transporte público con una distribución de la demanda a lo largo de ella no uniforme y más realista que estudios precedentes, en el que se calcula el número de paradas en la ruta minimizando el coste total y realizando un análisis de sensibilidad de éste con respecto a varios parámetros (valor del tiempo del usuario, velocidad de acceso y densidad de la demanda). Schöbel (2005) enfoca el problema de la localización de



paradas como una función que trata de maximizar la cobertura con el mínimo número de paradas posibles, mediante un problema de Set-covering.

dell'Olio (2005) y dell'Olio et al. (2006) propone un modelo combinado de optimización de frecuencias y espaciamiento de paradas en el que se considera por primera vez las restricciones de capacidad de los buses, utilizando una matriz de viajes en transporte público fija y conocida. En estos trabajos se proponen tres modelos: el primer modelo resuelve el problema de ubicación de paradas minimizando el coste de usuario y operador de transporte público (Vega et al., 2002), el segundo modelo minimiza la misma función de costes pero además permite dimensionar el servicio permitiendo calcular la frecuencia y el número de buses para que la demanda sea satisfecha. Finalmente el tercer y principal modelo resuelve las limitaciones planteadas por los dos primeros de ubicación de paradas y optimización de frecuencias mediante un algoritmo de optimización binivel. El modelo presentado en la Parte III de esta tesis tiene como punto de partida estas investigaciones, continuando con varias de las líneas de investigación que el autor propone en su tesis doctoral.

3.3. MODELOS DE UBICACIÓN Y OPERACIÓN DE PARADAS DE BUS A NIVEL MICROSCÓPICO.

Existen otros enfoques a la hora de analizar la ubicación y la operación de las paradas de bus desde un punto de vista más táctico y operacional. De esta manera, surgen investigaciones la cuales se centran en una parada en concreta, o bien una tipología determinada de parada de bus, analizando su capacidad, operatividad e influencia sobre el tráfico no solo privado sino del propio transporte público.

Así surgen trabajos como el de Gibson y Fernández (1995) en el que estudian la influencia del ciclo semafórico y la razón de verde sobre la capacidad de paradas de bus, demostrando que la mínimas demoras se conseguían con ciclos cortos y razones de verde altas, llegando además a la conclusión de que el grado de saturación de una parada no debe exceder el 65%. En este trabajo surge por primera vez el concepto de parada de bus dividida. Gibson (1996) estudia mediante un modelo de simulación específico: IRENE (Gibson et al., 1989), el efecto de semáforos aguas abajo sobre la capacidad de las paradas de bus con más de un área de parada (multi-berth), tomando



como variables el ciclo del semáforo, la proporción de verde, distancia entre la parada y el semáforo y la disciplina de salida de los buses de la parada. En dicho trabajo se comparan los resultados con los propuestos por el HCM (TRB, 1994), pero añadiendo dos disciplinas de salida de la parada: FIFO (First In, First Out), que es la que asume el HCM y FIAO (First In, Any Out: adelantamiento en parada permitido). Aplicando este modelo con varios valores para cada una de las variables, se llegan a reducciones de capacidad de la parada de bus de hasta el 40%.

R. Fernández desarrolla el modelo PASSION (PARallel Stop SimulatIOn) en 2001, mejorando las limitaciones de IRENE en cuanto a que ofrece más patrones de llegada de buses y pasajeros a la parada, se simulan los tiempos de subida/bajada al vehículo y considera además los tiempos de espera en la parada, reportando reducciones de capacidad ligeramente mayores que los obtenidos con IRENE. Posteriores actualizaciones de PASSION se han utilizado para simular la interacción entre buses, pasajeros y tráfico en las paradas de bus (Fernández, 2001a, 2001b, 2003 y 2007; Fernández y Planzer, 2002; Fernández y Tyler, 2005).

Wong et al. (1998) analizan el efecto de una parada de bus no segregada próximas a semáforos, donde los buses ocupan el carril e impiden el paso de los vehículos, proponiendo una nueva expresión que calcula las demoras basándose en la formulación clásica de Webster y Cobbe (1966) pero añadiendo términos que simulan el efecto de la parada de bus.

Silva (2001) desarrolla BusSIGSIM, una aplicación que permite simular vehículos y buses en las cercanías de las paradas, replicando comportamientos más reales que los mostrados hasta ese momento.

Estas herramientas surgieron como consecuencia de la orientación de los software de microsimulación hacia el tráfico privado, quedando relegado el transporte público a un papel de mero acompañante de los elementos de la red, de hecho, Fernandez y Burgos (2004) realizan un análisis de cinco de los microsimuladores más utilizados (AIMSUN[®], DRACULA[®], CORSIM[®], VISSIM[®] y PARAMICS[®] donde queda de manifiesto algunas carencias de los modelos de transporte público a la hora de realizar microsimulaciones desde el punto de vista de la demanda.



Más recientemente, Koshy y Arasan (2005) estudian la influencia de las paradas de bus en el flujo de tráfico teniendo en cuenta la composición del mismo, estableciendo parámetros para el cambio de tipología de parada. Para ello desarrollan el modelo de simulación HETERO-SIM. Furth y SanClemente (2006) analizan la influencia de las rampas y las pendientes en los aumentos de demoras en el transporte público. Demuestran que a partir de un 3% los efectos son apreciables, siendo preferible además las localizaciones tipo Far-Side.

Posteriormente, Cortés et al. (2007) desarrollan una API (Application Programming Interface) llamada MISTRANSIT (Microscopic Simulation of TRANSIT) para el programa PARAMICS, analizando la capacidad de paradas de bus divididas, influencia de los semáforos aguas abajo y efectos de estrategias de priorización semafórica en las demoras de los usuarios y del tráfico.

Shi et al. (2007) establecen una metodología para definir la tipología y número de áreas para una parada en base al número de áreas efectivas de cada tipo y la demanda de buses y usuarios. Fernandez et al. (2007) enfocan su investigación en analizar la interacción entre el tráfico y las paradas de bus cuando éstas se sitúan en las cercanías de un cruce semaforizado, incluyendo en la simulación un modelo de comportamiento de los usuarios. Finalmente, Zhao et al. (2008) estudian la afección al tráfico del posicionamiento de una parada entre dos intersecciones cercanas, haciendo uso de un modelo AC (Autómata Celular).

3.4. CONSIDERACIONES FINALES

Como se ha podido comprobar, en los trabajos expuestos a nivel macroscópico hay varios enfoques similares consistentes en la minimización de una función de costes o la maximización de la cobertura ofrecida. Además, es común que los modelos planteados asuman simplificaciones. Por ejemplo, una parte de estos se basan en asumir que la distribución de la demanda es constante a lo largo de la línea de transporte público.

Por otra parte, las aplicaciones de estos trabajos están orientadas a una sola ruta de transporte público, o bien se considera una demanda fija para el sistema, y, de todos los



trabajos encontrados, solamente uno (dell'Olio, 2005) considera la congestión en el transporte público mediante la restricción de capacidad de los buses.

En cuanto a las investigaciones reportadas a nivel microscópico, ha quedado patente que, debido a ligeras carencias presentadas en varios modelos de microsimulación comerciales existentes (si bien en los últimos años se han mejorado las prestaciones en este aspecto), se han desarrollado aplicaciones o modelos completos para analizar la parada de bus desde un punto de vista más operacional, estimando la capacidad en función de varios parámetros del tráfico: ciclo semafórico, proporción de verde, composición del tráfico, distancia a la intersección, etc. En todos estos trabajos se ha tenido en cuenta la congestión debida al tráfico vehicular y la debida a problemas de capacidad de las paradas, aplicándose generalmente a una parada o tipología de la misma en concreto.

Con la investigación desarrollada en esta tesis se complementan varios de estos trabajos puesto que se analiza el problema de ubicación de paradas de bus a nivel estratégico en toda una ciudad y a nivel táctico para uno o varios ejes en particular. Además, se modeliza la congestión en la red vial, en los buses de transporte público y en las propias paradas de bus. Más concretamente, y recordando lo expuesto en el apartado 3.2, el modelo presentado en la Parte III de esta tesis tiene como punto de partida la investigación de dell'Olio (2005).

Capítulo 4

***LA OPTIMIZACIÓN BINIVEL APLICADA AL
TRANSPORTE***



CAPÍTULO 4. LA OPTIMIZACIÓN BINIVEL APLICADA AL TRANSPORTE.

4.1. INTRODUCCIÓN.

La programación binivel constituye actualmente una de las áreas más importantes de la optimización global. Los programas de optimización binivel (o programación de dos niveles) presentan propiedades específicas, algunas relacionadas con su elevado grado de no convexidad y no diferenciabilidad, que hacen que su resolución sea particularmente difícil y un desafío de considerable interés. Son innumerables los problemas de aplicación práctica que aprovechan su propia estructura hiperjerárquica para plantear y resolver formulaciones a través de programación binivel.

Las primeras formulaciones en la literatura de un programa binivel datan de principios de los años ochenta, lo que demuestra que el estudio de sus propiedades y de su resolución es un tópico de actualidad en el campo de la investigación. Por ello es recomendable realizar un trabajo actualizado de síntesis sobre programación binivel, que permita una rápida familiarización con esta importante área de la investigación.

A grandes rasgos se podría definir la programación binivel como *“un programa matemático que contiene un problema de optimización en las restricciones”*. Para un perfecto desarrollo de esta síntesis es necesario enfocarlo simultáneamente desde dos



puntos de vista: por un lado, como lógica extensión de la programación matemática, y por otro, como generalización de un problema particular de la teoría de juegos (*Juego de Stackelberg*).

La teoría de juegos trata con situaciones de decisión en las que dos agentes participantes tienen objetivos en conflicto o en competencia. En un conflicto de juego, dos agentes, conocidos como jugadores, tendrán cada uno un número de alternativas o estrategias. Asociada a cada par de estrategias hay una recompensa que un jugador paga al otro.

Este tipo de juegos, también denominados como juegos no cooperativos, donde la ganancia de un jugador es igual a la pérdida del otro y viceversa, se conocen como *juegos de suma cero entre dos personas*.

La teoría de juegos no cooperativos se usa para formular muchos de los problemas de la planificación del transporte, modelizando las complejas interacciones que se dan entre los diversos agentes participantes del mercado de transporte, cada uno de ellos con objetivos propios diferenciados. Los modelos de equilibrio aparecen como resultado de estas interacciones y su formulación matemática se fundamenta en modelos de optimización.

Los dos fundamentales tipos de equilibrio que aparecen son el denominado equilibrio de *Cournot-Nash* y el equilibrio de *Stackelberg* (Stackelberg, 1952).

En el equilibrio de *Cournot-Nash* cada jugador o agente participante intenta maximizar su utilidad de forma no cooperativa, asumiendo como conocidas las decisiones de resto de jugadores. El equilibrio se alcanza cuando ningún jugador puede mejorar su utilidad mediante cambios unilaterales. Los modelos de asignación de tráfico en equilibrio o de asignación de usuarios en sistemas de transporte público son ejemplos de este tipo de equilibrio. En Codina et al (2003) se realiza una profunda revisión de los modelos de equilibrio de *Cournot-Nash* que se han aplicado en la planificación del transporte urbano.

En el equilibrio de *Stackelberg* existe un jugador especial, denominado *líder* que puede conocer las reacciones del resto de jugadores a su estrategia. El resto de jugadores se denominan *seguidores*. El líder puede elegir su estrategia dentro de un cierto conjunto, independientemente de las estrategias de sus seguidores, mientras que cada seguidor



puede elegir una estrategia dentro de un conjunto de ellas parametrizadas por la elección efectuada por el líder. La estrategia de un seguidor depende de la estrategia del líder, y además su utilidad depende tanto de las estrategias de los otros seguidores como de la del líder.

Este juego ha sido estudiado intensivamente por economistas y ha sido frecuentemente aplicado, por ejemplo: en el análisis de mercados oligopolísticos, en el diseño de nuevos productos y en la tarificación de la transmisión de la energía eléctrica, como en Hobbs y Nelson (1992).

Muchos de los problemas de planificación y de diseño de redes de transporte urbano son formulados mediante un problema de equilibrio de *Stackelberg*, debido a que su estructura jerárquica es adecuada para reflejar el proceso de toma de decisiones. Los operadores del sistema (líder) planifican o diseñan el sistema de transporte teniendo en cuenta el comportamiento de los usuarios (seguidores) ante sus políticas de gestión o inversión. En el nivel superior se minimizan los costes (sociales, económicos, ambientales, etc.) derivados de las políticas de los operadores, mientras que en el nivel inferior se describe el comportamiento de los usuarios en el sistema de transporte intervenido.

La formulación matemática de los juegos de equilibrio de *Stackelberg* es conocida como *programas matemáticos de restricciones de equilibrio* (MPEC en lo sucesivo). Un programa matemático con restricciones de equilibrio es un modelo de optimización en el que cierto conjunto de restricciones están definidas mediante una desigualdad variacional.

En este problema se distinguen claramente dos sub-problemas:

- El sub-problema de optimización, que recibe el nombre de problema exterior o problema del nivel superior.
- El sub-problema de la desigualdad variacional, que se le denomina problema interior o problema del nivel inferior.



El término de *restricciones de equilibrio* hace referencia a que las desigualdades variacionales modelizan ciertos equilibrios que aparecen en problemas de economía e ingeniería, como es el caso de equilibrio entre la oferta y la demanda de transporte.

En definitiva, la estructura general de un MPEC en un problema de planificación del transporte es:

- Nivel Superior. Define el objetivo del planificador del sistema de transporte.
- Nivel Inferior. Representa el comportamiento de los usuarios en la red de transporte modelizada mediante un problema de asignación en equilibrio

4.2. FORMULACIÓN MATEMÁTICA DEL JUEGO DE EQUILIBRIO DE STACKELBERG.

Como se ha mencionado anteriormente, los juegos de *Stackelberg* se formulan matemáticamente empleando la programación matemática con restricciones de equilibrio (MPEC). Estos problemas de optimización contienen dentro del conjunto de restricciones un subproblema de desigualdades variacionales o de optimización que definen la situación de equilibrio. En esta sección se describe la estructura matemática de estos modelos que posteriormente, servirá de base para describir los modelos de optimización binivel empleados en el área de transporte.

El MPEC considera dos conjuntos de variables, que denotaremos $x \in \mathfrak{R}^n$ e $y \in \mathfrak{R}^m$. Las variables x parametrizan una desigualdad variacional cuya solución define los valores de la variable y . Las variables x reciben el nombre variables del nivel superior y las variables y el de variables del nivel inferior.

El MPEC puede ser formulado del siguiente modo. Se consideran dos funciones $F: \mathfrak{R}^{n+m} \rightarrow \mathfrak{R}$ y $f: \mathfrak{R}^{n+m} \rightarrow \mathfrak{R}^m$, un conjunto cerrado y convexo $Z \in \mathfrak{R}^{n+m}$ y una aplicación punto-conjunto $\Omega: \mathfrak{R}^{n+m} \rightarrow \mathfrak{R}^m$ cuyas imágenes son conjuntos cerrados y convexos, es decir, para cada valor $x \in \mathfrak{R}^n$, $\Omega(x)$, es un subconjunto cerrado y convexo de \mathfrak{R}^m . La función F es la función objetivo del problema de optimización; f es la



función de costes (equilibrio) de la desigualdad variacional, Z es la región factible del problema de optimización para el par (x, y) y el conjunto $\Omega(x)$ define la región factible para el problema de la desigualdad variacional.

Por lo tanto, el problema MPEC se formula como:

$$\begin{aligned} \min. & F(x, y) \\ \text{s.a.} & (x, y) \in Z \\ & y \in S(x) \end{aligned} \quad (4.1)$$

donde $S(x)$ es el conjunto de soluciones de la desigualdad variacional definida por el par $(f(x, \cdot), \Omega(x))$, es decir, el vector y pertenece al conjunto $S(x)$ si y sólo si y es un elemento de $\Omega(x)$ que cumple la desigualdad

$$f(x, y)^T (v - y) \geq 0, \forall v \in \Omega(x) \quad (4.2)$$

La formulación de MPEC recoge numerosos casos particulares de interés. Uno especialmente importante y que puede ser considerado como la formulación predecesora del MPEC, aparece cuando $f(x, \cdot)$ es el gradiente respecto a la variable y de cierta función $\theta: \mathbb{R}^{n+m} \rightarrow \mathbb{R}^m$, es decir, $f(x, y) = \nabla_y \theta(x, y)$ donde σ_y denota la derivada parcial con respecto a la variable y . En este caso las soluciones de la desigualdad variacional coinciden con los puntos estacionarios del siguiente problema de optimización

$$\begin{aligned} \min. & \theta(x, y) \\ \text{s.a.} & y \in \Omega(x) \end{aligned} \quad (4.3)$$

Cuando en la formulación del MPEC (1) la restricción $y \in \Omega(x)$ es reemplazada por

$$y \in \arg \min \{ \theta(x, y) : y \in \Omega(x) \} \quad (4.4)$$

donde “argmin” denota el conjunto de soluciones del problema de optimización, entonces el problema MPEC recibe el nombre de problema de optimización binivel.



La diferencia entre un equilibrio de *Stackelberg* y el problema de optimización binivel, radica en que en el primer caso las decisiones del agente inferior no afectan al criterio o estrategia del nivel superior, mientras que en el planteamiento de optimización binivel sí, como se indicará en el siguiente apartado.

La extensión del MPEC hacia el problema de optimización binivel, además de conservar la estructura jerárquica de un participante *líder* y un participante *seguidor*, permite tener en cuenta otras restricciones adicionales para las estrategias de los jugadores.

4.3. EL PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN BINIVEL

Los problemas de optimización multinivel son programas matemáticos en los cuales existe un subconjunto de sus variables que se encuentran restringidas a una solución de otros problemas de optimización parametrizados por las variables restantes. Cuando el número de estos otros problemas de optimización es uno, se habla de programación binivel. Los problemas de programación tri-nivel resultan cuando estos otros problemas de optimización son asimismo un problema de programación binivel. Por extensión de esta idea es posible definir programas multinivel con cualquier número de niveles.

Tal y como se justificó anteriormente, un programa de optimización donde sólo participan dos agentes de decisión, se conoce como problema de programación de dos niveles, o más comúnmente *problema de optimización binivel*. El primer agente participante, decide en el nivel superior (llamado también, nivel del "líder"), en base a un primer conjunto de variables (x), mientras que el segundo agente participante, decide en el nivel inferior (llamado también, nivel "seguidor"), controlando un segundo conjunto de variables (y).

Una característica distintiva de los sistemas multiniveles, y por extensión de los sistemas binivel, es que las decisiones tomadas en un nivel pueden influir en el comportamiento del agente que toma las decisiones en el otro nivel (aunque no controle sus acciones).

Entre las características más comunes de organizaciones de perfil multinivel, podemos encontrarnos con varios casos: un primer caso, donde existe una toma de decisiones

interactiva entre unidades dentro de una estructura predominantemente jerárquica; otro caso, donde cada nivel subordinado ejecuta sus decisiones o políticas después de las decisiones tomadas en un nivel superior; y un último caso, donde cada unidad maximiza sus beneficios de forma independiente, pero es afectada por las acciones de otras unidades externas.

Un modelo de programación binivel es capaz de incorporar todas estas características. El marco de desarrollo de estos modelos, es capaz de tratar con estructuras donde interactúan una unidad de dirección corporativa al nivel más alto (líder) y una o más unidades subordinadas en el nivel bajo (seguidor).

Habitualmente, el agente superior toma una decisión según su objetivo. Dada esta decisión, el agente inferior se rige de acuerdo al objetivo que le está asociado. La decisión del nivel superior puede dar lugar a una gama de posibilidades de criterios de selección del nivel inferior. Por otro lado la reacción del agente inferior hace que el agente superior, en base a su estrategia, tome nuevas decisiones. De esta forma, las decisiones son tomadas de arriba hacia abajo a lo largo de la cadena hiperjerárquica, mientras las decisiones del nivel inferior afectan a las decisiones del nivel superior.

4.3.1. DEFINICIONES

Un problema de programación binivel (BLP en lo sucesivo), en su forma más general, presenta la siguiente formulación:

$$\min_{x,y} F(x,y) \tag{4.5}$$

$$s.a. \quad x \in X \tag{4.6}$$

$$g(x,y) \leq 0 \tag{4.7}$$

$$y \in \arg \min \{f(x,y) : y \in Y, h(x,y) \leq 0\} \tag{4.8}$$

Donde X e Y son subconjuntos de \mathfrak{R}^n y \mathfrak{R}^m respectivamente, F y f son funciones reales tales que $F, f : \mathfrak{R}^{n+m} \rightarrow \mathfrak{R}$, g y h son funciones vectoriales reales tales que $g : \mathfrak{R}^{n+m} \rightarrow \mathfrak{R}^{p_1}$ y $h : \mathfrak{R}^{n+m} \rightarrow \mathfrak{R}^{p_2}$ con n y $m \in \mathbb{N}$ y p_1 y $p_2 \in \mathbb{N} \cup \{0\}$.



El problema de optimización para el primer nivel del problema BLP consiste en minimizar en x e y la función $F(x, y)$ sujeto a las restricciones (4.6), (4.7) y (4.8). El problema de optimización para el nivel inferior consiste en la minimización en y , parametrizado por x , y se denomina como $P(x)$ problema de segundo nivel en y :

$$\begin{aligned} \min_{y \in Y} \quad & f(x, y) \\ \text{s.a.} \quad & h(x, y) \leq 0 \end{aligned} \quad (4.9)$$

De esta forma, x es designado por un vector de variables del primer nivel e y por un vector de variables del segundo nivel. De igual modo, $g(x, y) \leq 0$ y $h(x, y) \leq 0$ representan respectivamente las restricciones del primer y del segundo nivel. La función $F(x, y)$ se denomina función objetivo del primer nivel, en cuanto a $f(x, y)$ es designada como función objetivo del segundo nivel.

Existe una versión del BLP donde se omite el objetivo del segundo nivel (por lo tanto la función objetivo $f(x, y)$). Esta versión se define como problema relajado PR asociado al problema BLP, tal que:

$$\begin{aligned} \min_{x, y \in Y} \quad & F(x, y) \\ \text{s.a.} \quad & g(x, y) \leq 0, \quad h(x, y) \leq 0 \end{aligned} \quad (4.10)$$

El valor óptimo de este problema relajado PR es un límite inferior para el valor óptimo del problema BLP.

Otras importantes definiciones y anotaciones, para comprender mejor el problema de programación binivel, son las siguientes:

- Conjunto factible del problema relajado PR,

$$CR = \{(x, y) \in X \times Y : g(x, y) \leq 0, \quad h(x, y) \leq 0\} \quad (4.11)$$
- Para cada $x \in X$, el conjunto factible del problema de segundo nivel $P(x)$,

$$C(x) = \{y : y \in Y, \quad h(x, y) \leq 0\} \quad (4.12)$$
- Para cada $x \in X$, el conjunto de reacción del problema de segundo nivel



$$M(x) = \{y : y = \arg \min\{f(x, y) : y \in C(x)\}\} \quad (4.13)$$

- Para cada $x \in X$, y cualquier valor $y \in M(x)$, el valor óptimo del problema $P(x)$,

$$v(x) = \min\{f(x, y) : y \in C(x)\} \quad (4.14)$$

- Conjunto factible del problema BLP, también designado por región inducida,

$$RI = \{(x, y) : (x, y) \in CR, \quad y \in M(x)\} \quad (4.15)$$

La región inducida es el conjunto factible del BLP. De esta forma, un punto (x^L, y^L) es una solución óptima (mínimo) local para el problema BLP si $(x^L, y^L) \in RI$ y si existe una región próxima V de (x^L, y^L) tal que $F(x^L, y^L) \leq F(x, y), \forall (x, y) \in V \cap RI$. Del mismo modo, un punto (x^G, y^G) es una solución óptima (mínimo) global del problema BLP si $(x^G, y^G) \in RI$ y $F(x^G, y^G) \leq F(x, y), \forall (x, y) \in RI$.

Las diferentes clases del problema BLP difieren entre sí en concordancia con las distintas particularizaciones de las funciones F, f, g y h y de los conjuntos X e Y . En todas las clases, es usual considerar problemas de optimización de dos niveles con y sin restricciones del primer nivel. Un problema de optimización binivel sin restricciones del primer nivel (BLP2 en lo sucesivo) puede ser descrito como:

$$\begin{aligned} \min_{x,y} \quad & F(x, y) \\ & y \in \arg \min\{f(x, y) : y \in Y, h(x, y) \leq 0\} \end{aligned} \quad (4.16)$$

Una de las clases de problemas de optimización binivel más frecuente en la literatura la conforman los *problemas de optimización binivel convexos*.

Un problema de optimización binivel se dice convexo (BLPC) cuando $X = \mathfrak{R}^n$, $Y = \mathfrak{R}^m$ y cuando son convexas en y las funciones $f(x, \cdot)$ y $h(x, \cdot)$ para todo x en \mathfrak{R}^n .

La principal ventaja de tratar con BLPC es que bajo una cualificación apropiada de las restricciones, el nivel inferior $P(x)$ puede ser reemplazado por las condiciones necesarias y suficientes de Karush-Kuhn-Tucker (KKT), para obtener un problema



matemático equivalente de un solo nivel. Sobre este último aspecto se recomienda consultar Bazaraa y Shetty (1979).

Los siguientes ejemplos presentados ilustran de forma clara las definiciones y problemas anteriormente definidos. Como primer ejemplo se considera el siguiente problema de optimización binivel sin restricciones en el primer nivel:

$$\begin{aligned} \min_{x,y} \quad & x - 2y \\ \text{s.a.} \quad & y \in \arg \min\{y : -1 \leq x + y \leq 1, -1 \leq x - y \leq 1\} \end{aligned} \quad (4.17)$$

En la Figura 4.1 se representa gráficamente el conjunto factible del problema relajado correspondiente $CR = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : -1 \leq x + y \leq 1, -1 \leq x - y \leq 1\}$ (área encerrada por las líneas continuas y las líneas a trazos) y la región inducida (línea de trazos) $RI = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : x + y = -1, -1 \leq x \leq 0\} \cup \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : x - y = 1, 0 \leq x \leq 1\}$ del problema (3.24.). Un punto $(x^R, y^R) = (0, 1)$ es una solución óptima del problema relajado $(\min_{(x,y) \in CR} x - 2y)$ mientras que un punto $(x^G, y^G) = (-1, 0)$ es una solución óptima del problema de optimización binivel (4.17) $(\min_{(x,y) \in RI} x - 2y)$.

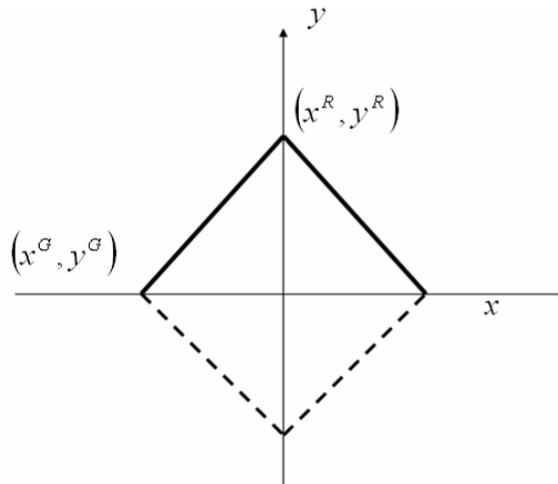


Fig. 4.1.- Conjunto factible del problema relajado y región inducida, ejemplo sin restricciones

Si se incluye una restricción $y \geq -\frac{1}{2}$ para el primer nivel del problema anterior, se obtiene el siguiente problema de optimización binivel:



$$\begin{aligned} \min_{x,y} \quad & x - 2y \\ \text{s.a.} \quad & y \geq -\frac{1}{2} \\ & y \in \arg \min\{y : -1 \leq x + y \leq 1, -1 \leq x - y \leq 1\} \end{aligned} \quad (4.18)$$

Para este ejemplo el conjunto factible del problema relajado correspondiente CR es $\{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : y \geq -\frac{1}{2}, -1 \leq x + y \leq 1, -1 \leq x - y \leq 1\}$ (área encerrada por todas las líneas continuas y a trazo) y la región inducida RI (líneas a trazos) es $\{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : x + y = -1, -1 \leq x \leq -\frac{1}{2}\} \cup \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : x - y = 1, \frac{1}{2} \leq x \leq 1\}$. Estos dos conjuntos son representados en la Figura 4.2. La restricción $y \geq -\frac{1}{2}$, para el primer nivel del problema (4.18), separa la región inducida en dos segmentos de rectas disjuntos, transformando RI en un conjunto desconexo. Las soluciones óptimas del problema relajado, (x^R, y^R) , y del propio BLP (x^G, y^G) , coinciden con las respectivas soluciones óptimas del ejemplo anterior.

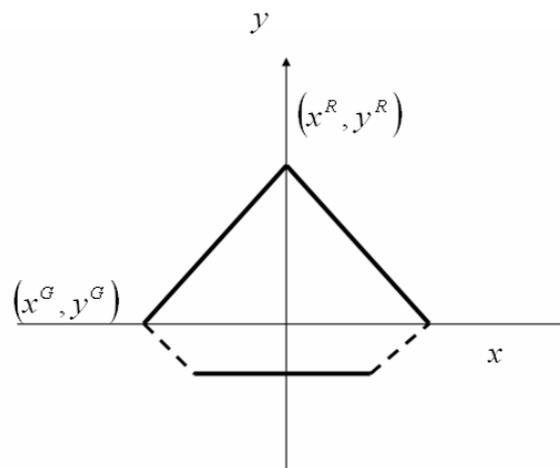


Fig. 4.2.-Conjunto factible del problema relajado y región inducida, ejemplo con restricciones.

Estos dos ejemplos anteriormente representados muestran una característica que, como regla general, están asociada a programas de programación binivel: a pesar de su denominación, el problema de optimización binivel convexo puede inducir regiones no-



convexas que pueden estar desconexas o incluso vacías, en presencia de restricciones en el primer nivel del BLP.

4.4. PROPIEDADES DE PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN BINIVEL.

La programación binivel representa un interesante y fértil campo dentro de la programación matemática, donde se han obtenido algunos importantes resultados. En esta sección se presentan algunas propiedades conocidas del BLP.

Un problema de optimización binivel necesariamente no tiene solución. Por otro lado, que las funciones F, f, g y h , del problema de optimización binivel, sean continuas y acotadas no garantiza la existencia de solución.

Para ello, y antes de sintetizar las condiciones que debe cumplir el BLP para garantizar la existencia de solución, se desarrolla un ejemplo práctico muy clarificador de estos aspectos anteriormente comentados (Bard, 1998).

Supongamos que deseamos resolver el siguiente problema de optimización binivel (ejemplo 1),

$$\underset{x_i}{\text{Min}} \quad F = x_1 \cdot (2y_1 + 3y_2) + x_2 \cdot (4y_1 + y_2)$$

s.a.

$$x_1 + x_2 = 1$$

$$x_1 \geq 0, x_2 \geq 0$$

$$\underset{y_i}{\text{Min}} \quad f = x_1 \cdot (-y_1 - 4y_2) + x_2 \cdot (-3y_1 - 2y_2)$$

s.a.

$$y_1 + y_2 = 1$$

$$y_1 \geq 0, y_2 \geq 0 \tag{4.19}$$

La solución al problema de optimización del nivel inferior o del seguidor, como función parametrizada de x_i , es:



$$\hat{y}(x) = \begin{cases} (1,0) & \text{para } x_1 + 3x_2 > 4x_1 + 2x_2; x_1 < \frac{1}{4} \\ y_1 + y_2 = 1 & \text{para } x_1 = \frac{1}{4} \\ (0,1) & \text{para } x_1 > \frac{1}{4} \end{cases} \quad (4.20)$$

Sustituyendo estos valores en el problema del nivel superior o del líder,

$$\text{Min}_{x_i} F = \begin{cases} 2x_1 + 4x_2 & x_1 < \frac{1}{4} \\ 2y_1 + \frac{3}{2} & (0 \leq y_1 \leq 1) \quad x_1 = \frac{1}{4} \\ 3x_1 + x_2 & x_1 > \frac{1}{4} \end{cases}$$

s.a.

$$x_1 + x_2 = 1$$

$$x_1 \geq 0, x_2 \geq 0 \quad (4.21)$$

En forma grafica (ver figura 4.3.), el espacio solución para el problema planteado y la solución óptima para el líder es:

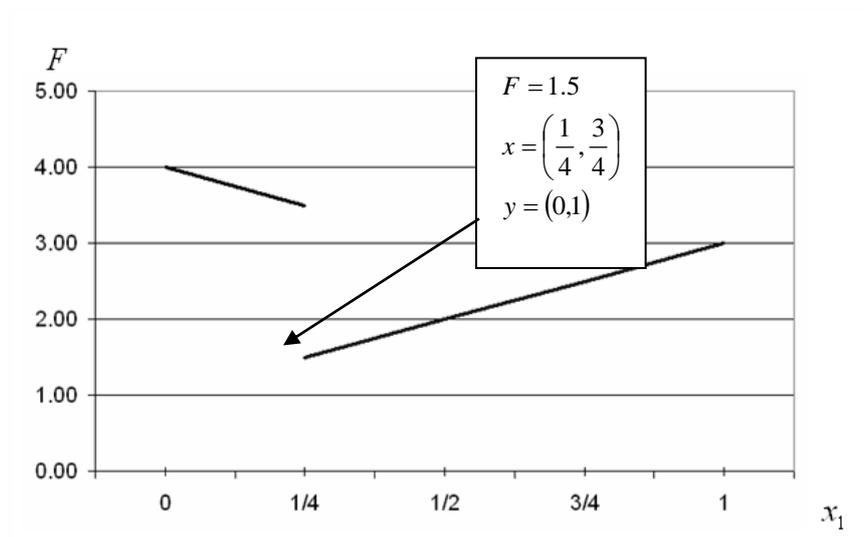


Fig. 4.3.- Espacio solución.

En el punto $x = (\frac{1}{4}, \frac{3}{4})$ la solución óptima del seguidor es $f = 1$ en cualquier punto de la recta $y_1 + y_2 = 1$. Para ese punto óptimo ($y_1 + y_2 = 1$) del seguidor y para el punto



$x = (\frac{1}{4}, \frac{3}{4})$, la solución correspondiente para el líder es $F = 2y_1 + \frac{3}{2} \Rightarrow F \in [1.5, 3.5]$. Es decir, nada garantiza que el líder alcance su punto óptimo, por lo tanto la existencia de solución no se puede garantizar.

Otra propiedad interesante es el orden de juego u orden de tomas de decisiones. Los roles del líder y del seguidor no son intercambiables, es decir el problema no es simétrico. Para demostrar esto último, con los datos del anterior ejemplo 1, se plantea el ejemplo 2 donde se intercambian los roles de los agentes participantes.

$$\underset{y_i}{\text{Min}} \quad f = x_1 \cdot (-y_1 - 4y_2) + x_2 \cdot (-3y_1 - 2y_2)$$

s.a.

$$y_1 + y_2 = 1$$

$$y_1 \geq 0, y_2 \geq 0$$

$$\underset{x_i}{\text{Min}} \quad F = x_1 \cdot (2y_1 + 3y_2) + x_2 \cdot (4y_1 + y_2)$$

s.a.

$$x_1 + x_2 = 1$$

$$x_1 \geq 0, x_2 \geq 0 \tag{4.22}$$

La solución al problema de optimización del nivel inferior o del seguidor, como función parametrizada de y_j , es:

$$\hat{x}(y) = \begin{cases} (1,0) & \text{para } 2y_1 + 3y_2 < 4y_1 + y_2; y_1 > \frac{1}{2} \\ x_1 + x_2 = 1 & \text{para } y_1 = \frac{1}{2} \\ (0,1) & \text{para } y_1 < \frac{1}{2} \end{cases} \tag{4.23}$$

Sustituyendo estos valores en el problema del nivel superior o del líder,



$$\text{Min}_{y_i} f = \begin{cases} -y_1 - 4y_2 & y_1 > \frac{1}{2} \\ -(3-2x_1)y_1 - (2x_1+2)y_2 & y_1 = \frac{1}{2} \\ -3y_1 - 2y_2 & y_1 < \frac{1}{2} \end{cases}$$

s.a.

$$y_1 + y_2 = 1$$

$$y_1 \geq 0, y_2 \geq 0 \tag{4.24}$$

En forma grafica (ver Figura 4.4.), el espacio solución para el problema planteado y la solución óptima para el líder es:

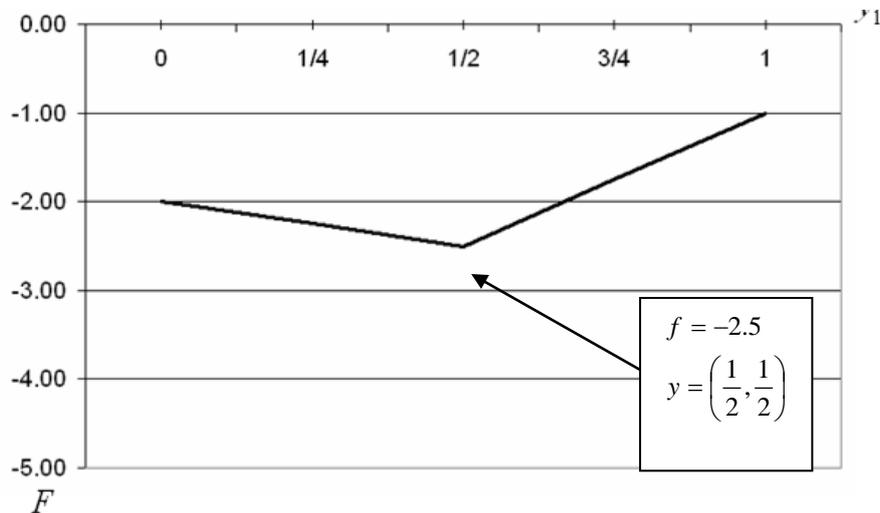


Fig. 4.4.- Espacio solución con intercambio de rol

En el punto $y = \left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right)$ la solución óptima del seguidor es $F = -2.5$ en cualquier punto de la recta $x_1 + x_2 = 1$.

En la Tabla 4.1. se muestran las dos soluciones de los dos ejemplo y la solución del equilibrio de *Cournot-Nash*.



Tabla 4.1.- Comparativa de soluciones de los ejemplos y del equilibrio de Nash

	Ejemplo 1	Ejemplo 2	Equilibrio Nash
Solución (x)	$\left(\frac{1}{4}, \frac{3}{4}\right)$	$x_1 + x_2 = 1$	$\left(\frac{1}{4}, \frac{3}{4}\right)$
Valor de F	1.5	2.5	2.5
Solución (y)	(0,1)	$\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right)$	$\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right)$
Valor de f	-2.5	-2.5	-2.5

Se puede comprobar en los resultados obtenidos que, por un lado el cambio de rol de los agentes participantes no es simétrico, y por otro lado se detecta que en el equilibrio de *Stackelberg* se obtiene mejores resultados que el equilibrio de *Cournot-Nash*.

Las condiciones de existencia de solución de un problema de programación binivel están asociadas a las características de una aplicación punto-conjunto $M(\cdot): X \subset \mathfrak{R}^n \rightarrow \Omega(\mathfrak{R}^m)$ en que $\Omega(\mathfrak{R}^m)$ representa el conjunto de todos los subconjuntos de \mathfrak{R}^m .

El teorema siguiente revela una condición suficiente para que una aplicación $M(\cdot)$ sea univoca (para que $M(\cdot)$ sea una aplicación punto-a-punto de \mathfrak{R}^n en \mathfrak{R}^m), continua y acotada.

Si para cada $x \in X$, f y h son funciones dos veces continuamente diferenciables para todo $y \in C(x)$, f es estrictamente convexa para todo y en $C(x)$ y el conjunto $C(x)$ es compacto y convexo, entonces $M(\cdot)$ es una aplicación univoca, continua y acotada. Una demostración de este teorema puede encontrarse en Dantzig et al (1967) y en Hogan (1973).

En Edmunds y Bard (1991), se demuestra que si además de las condiciones anteriormente descritas, F es continua en x y en y y además X es un conjunto compacto, entonces existe siempre una solución para el problema BLP2 (problema de optimización binivel sin restricciones).



El hecho de que $M(\cdot)$ es acotada y X es un conjunto compacto implica que la región inducida RI también será compacta. Al minimizar una función continua sobre un conjunto compacto se garantiza la existencia de solución.

El resultado es extensible al problema BLP considerando compacto el conjunto definido por las restricciones del primer nivel $\{(x, y): g(x, y) \leq 0\}$ y si existe al menos un $x \in X$ tal que $g(x, y(x)) \leq 0$.

4.5. CASOS PARTICULARES DE OPTIMIZACIÓN BINIVEL.

Los casos particulares más comunes existentes en la literatura actual, del problema BLPC son:

- BLLP – programa de dos niveles lineal en el que todas las funciones implicadas son lineales (caso de dos ejemplos anteriormente discutidos)
- BLLQP – programa de dos niveles lineal-cuadrática en el cual las funciones F, g y h son lineales y la función objetivo del segundo nivel f es cuadrática y estrictamente convexa en y .
- BLQP – programa de dos niveles cuadrático en el cual la función objetivo del primer nivel F es también cuadrática (convexo o no convexa).

4.5.1. EL CASO DEL PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN BINIVEL LINEAL.

La forma más general del problema de optimización binivel lineal BLLP es:

$$\underset{x \in X_1}{\text{Min}} \quad F(x, y) = c_1x + d_1y$$

s.a.

$$A_1x + B_1y \leq b_1$$

$$\underset{y \in Y_1}{\text{Min}} \quad f(x, y) = c_2x + d_2y$$

s.a.

$$A_2x + B_2y \leq b_2 \tag{2.32}$$



Algunas definiciones del problema de optimización binivel lineal BLLP, son:

Se define como conjunto factible del problema BLLP,

$$CR = \{(x, y) : x \in X, y \in Y, A_1x + B_1y \leq b_1, A_2x + B_2y \leq b_2\} \quad (2.33)$$

- Para cada $x \in X$, el conjunto factible del problema de segundo nivel $P(x)$,

$$C(x) = \{y \in Y, B_2y \leq b_2 - A_2x\} \quad (2.34)$$

- Para cada $x \in X$, el conjunto de reacción del problema de segundo nivel

$$M(x) = \left\{ y \in Y : y \in \arg \min \left\{ f(x, \hat{y}) : \hat{y} \in C(x) \right\} \right\} \quad (2.35)$$

- Conjunto factible del problema BLP, también designado por región inducida,

$$RI = \{(x, y) : (x, y) \in CR, y \in M(x)\} \quad (2.36)$$

Cuando CR y $M(x)$ son no-vacios, el problema de optimización binivel lineal BLLP puede ser escrito como:

$$\min \{F(x, y) : (x, y) \in RI\} \quad (2.37)$$

Para complementar las anteriores definiciones se desarrolla a continuación un ejemplo (Bard, 1998) que ayudará a entender el problema de optimización binivel lineal BLLP.

$$\begin{array}{ll} \text{Min}_{x \geq 0,} & F(x, y) = x - 4y \end{array}$$

s.a.

$$\begin{array}{ll} \text{Min}_{y \geq 0,} & f(y) = y \end{array}$$

s.a.

$$-x - y \leq -3$$

$$-2x + y \leq 0$$

$$2x + y \leq 12$$



$$-3x + 2y \leq -4 \quad (2.38)$$

En la Figura 2.5. se puede ver la representación grafica del problema con los dos agentes participantes.

El conjunto factible del problema BLLP viene representado por el poliedro S . El conjunto factible del problema de segundo nivel $C(x)$, en este caso está representado por los puntos de la línea vertical contenida dentro del poliedro para un valor particular de x .

Dado que el objetivo del seguidor es minimizar en y , el conjunto de reacción del problema de segundo nivel es el valor más bajo de la serie de puntos en la vertical de $C(x)$, y esta dado por $M(x) = \max\left\{-x + 3, \frac{(3x-4)}{2}\right\}$.

$$C(x) = \max\left\{-x + 3, \frac{(3x-4)}{2}\right\}$$

Por lo tanto, la región inducida es la porción envuelta del perímetro de S . Esto no es otra cosa que las posibles reacciones del seguidor para diferentes valores de x . En la Figura 4.5. es la línea roja.

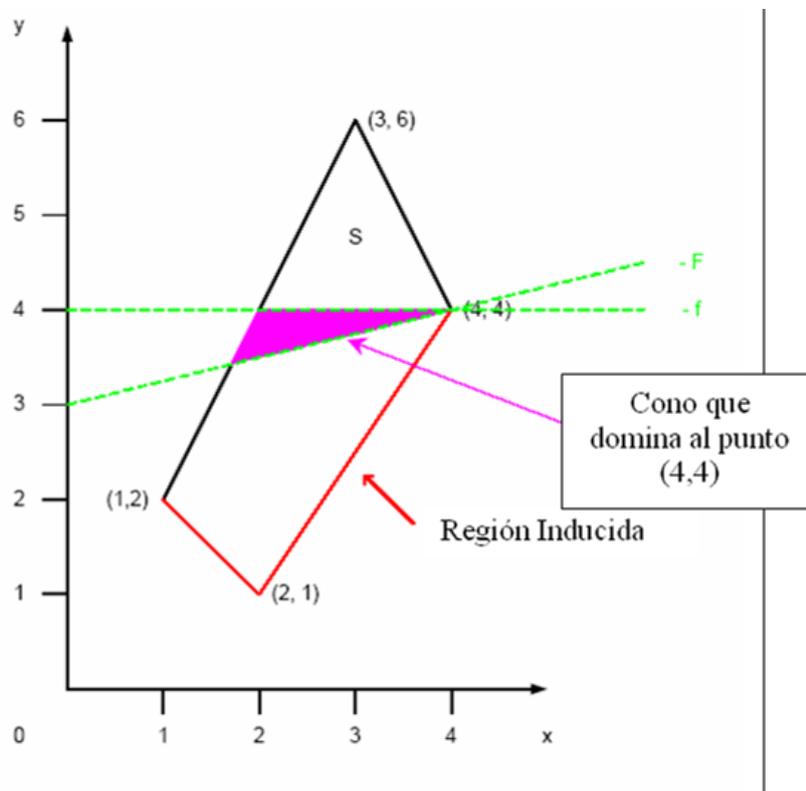


Fig. 4.5.- Representación grafica de problema de optimización binivel lineal.



La solución óptima para este ejemplo es el punto $(x^*, y^*) = (4, 4)$ con $F^* = -12$ y $f^* = 4$. Observando la figura se detecta que el líder dispone de un mejor valor de la función objetivo en el punto (3,6) pero este punto no pertenece a la región inducida.

Si se toma el valor de $x = 3$, el seguidor responderá con $y = 2.5$ obteniéndose $F(3, 2.5) = -7$ y $f(2.5) = 2.5$. Esto es claramente mejor para el seguidor pero no para el líder. Notar también que el punto (1,2) es un óptimo local.

Otra importante observación, es que la solución obtenida no es óptimo de Pareto, ya que cualquier punto contenido dentro de S y dentro del cono formado por los gradientes de $-F$ y $-f$ con origen en (4,4), dominan la solución de dicho vértice.

4.5.2. OTROS TIPOS DE PROBLEMAS DE OPTIMIZACIÓN MULTINIVEL.

Existen otras clases de problemas programación binivel que también llegan a ser discutidos en la literatura actual. Así, el conjunto de variables y de un problema de optimización binivel BLP puede ser definido como conjunto entero o entero mixto (esto es, con una componente entera y otra continua), clasificando el problema BLP como un problema de optimización binivel entero o entero mixto respectivamente.

Existen procesos de tipo enumerativo para el caso lineal binario como en Bard y Moore (1992) donde se presenta un algoritmo para el caso de programación binivel discreta. Para el caso entero mixto lineal es recomendable consultar Moore y Bard (1990) y para el caso entero mixto no lineal consultar Edmunds y Bard (1992).

Algunos autores han abordado otros casos particulares del problema BPL, como el caso de programación de optimización binivel geométrica en Segall (1989), o el caso en que el problema de segundo nivel es formulado de un modo diferente, como un problema de desigualdades variacionales, como en Friesz et al (1990). También se han tratado problemas de análisis discriminante a través de programación binivel como en Marcotte y Savard (1991).

La programación binivel puede ser tratada como un caso particular de programación de nivel múltiple. La complejidad de estos problemas cuando el número de niveles es superior a dos aumenta significativamente. Sobre este último aspecto tan particular es interesante consultar la referencia Blair (1992). El caso de tres niveles merece una



atención especial en la literatura. Sobre esto último en Bard (1984) se presenta el problema de la programación tri-nivel lineal y en Wen y Hsu (1986) se muestra un algoritmo híbrido para resolución del programa tri-nivel lineal.

En lo referente a un número genérico de niveles, el campo de investigación realizada es muy reducido, en Bard y Falk (1982) se presenta una solución explícita para programas multinivel y en Benson (1989) se trata sobre la estructura y propiedades de programas multinivel lineales.

4.6. APLICACIONES DEL PROBLEMA DE PROGRAMACIÓN BINIVEL EN PLANIFICACIÓN DEL TRANSPORTE.

Son varias las aplicaciones descritas en la literatura que han sido modeladas a través de la programación binivel. Entre las aplicaciones más frecuentes, son de destacar las siguientes.

Aplicación al *diseño de redes viales*, donde este tipo de modelos se caracteriza por emplear en el nivel inferior el modelo de asignación de tráfico formulado mediante el TAP. A propósito de este tipo de aplicaciones existen casos de programación binivel lineal, aplicaciones de diseño de redes teniendo en cuenta efectos de congestión sobre la red como en Marcotte (1986), diversos algoritmos e implementaciones heurísticas como en Marcotte (1988) y planteamientos de programación binivel no-lineal como en Suh y Kim (1992).

Otro tipo de aplicación habitual es el problema de *estimación de la demanda* sobre redes viaria, como en Florian y Chem (1991) donde se presenta una programación binivel para estimación de matrices O-D con aforos de tráfico. Estos modelos utilizan un conjunto actualizado de volúmenes de tráfico, conformando una información más económica de conseguir, en contraposición de las costosas encuestas domiciliarias.

El problema de *localización espacial* es otra aplicación frecuente de la programación binivel. En Miller, Friesz y Tobin (1992) se presentan algoritmos heurísticos para problemas de localización.

La dificultad de estos modelos es su aplicación a problemas reales, debido fundamentalmente a sus grandes dimensiones, del orden de varias decenas de miles de



variables del nivel superior y varios miles de variables en el nivel inferior y a sus malas propiedades matemáticas de los modelos, como son la no diferenciabilidad y la no convexidad. Esto ha hecho que la metodología desarrollada para resolver estos problemas sea heurística.

El problema de programación binivel BPL es extremadamente difícil de resolver. Este hecho se deriva de la complejidad de su conjunto factible (F), pudiendo ser debida a diversas causas:

- No convexidad del conjunto factible (F). La región factible puede dejar de ser convexa, aunque todas las funciones y conjuntos que intervengan en su definición lo sean.
- No es un conjunto cerrado. El conjunto factible puede ser incluso no cerrado. Esta propiedad puede hacer peligrar hasta la existencia de soluciones.
- Naturaleza multi-evaluada de la función $S(x)$. En muchas aplicaciones $S(x)$ es un conjunto que contiene más de un elemento para cada x .
- No diferencialidad de $S(x)$. La situación más favorable es que la aplicación multi-evaluada $S(x)$ de una aplicación (tenga un único elemento cada conjunto), en este caso dicha función puede ser no diferenciable.
- Pérdida de la propiedad de conexidad. La región factible puede ser la unión de varios conjuntos disjuntos. Esta propiedad le confiere una naturaleza combinatoria, con restricciones disyuntivas, que son de gran complejidad computacional, incluso en problemas lineales.

Se podría pensar que estas patologías están presentes exclusivamente en situaciones excepcionales, y que la exigencia de ciertas propiedades sobre las funciones y conjuntos que definen el BPL podrían evitarlas. Pero lo cierto es que en el caso menos exigente de programación lineal binivel, donde todas las funciones son indefinidamente diferenciables y convexas, y todos los conjuntos son poliedros, aparecen todas las anteriores patologías.



En Jeroslow (Jeroslow 1988) se ha demostrado que el problema lineal binivel pertenece a la clase de problemas NP-duros, es decir, que no existe actualmente un algoritmo que pueda resolver el problema en un número polinomial de operaciones en función de las dimensiones del mismo.

Pese a la dificultad intrínseca de los problemas binivel se han desarrollado algoritmos exactos para problemas de muy pequeña dimensión. Para resolver el problema lineal binivel se han aplicado algoritmos basados en enumeración implícita, algoritmos del tipo Branch-and-Bound como en Hansen et al. (1990), métodos basados en técnicas de penalizaciones exactas como o algoritmos fundamentados en métodos de descomposición.

La tipología de los diversos modelos basados en programación binivel aplicados en la planificación del transporte induce una clasificación en los algoritmos de resolución que están fuertemente condicionados por el problema a resolver.

Básicamente podemos encontrarnos con dos tipologías de problemas (ver Codina et al, 2004).

Tipo I: Modelos de estimación de parámetros para los modelos de asignación en equilibrio. Este conjunto de modelos persigue mejorar el conocimiento que se tiene de la red de transporte a partir de una nueva información experimental. A su vez esta clase de modelos contiene tres grandes subclases.

- Estimación de matrices de viaje origen-destino. Este dato es fundamental para definir el patrón de movilidad. Estos modelos obtienen estas matrices a partir de observaciones de aforo en la red y de otras matrices desactualizadas obtenidas en estudios anteriores de movilidad.
- Determinación de los parámetros del modelo de demanda. En ocasiones la matriz O-D está definida mediante un modelo de demanda que depende de un conjunto de parámetros. Este conjunto de parámetros es el que se desea estimar/actualizar a partir de toda la información disponible, como aforos en la red, encuestas domiciliarias u otros valores obtenidos en estudios similares.



- Determinación de los parámetros del modelo oferta. La especificación de la red de transporte requiere un conjunto de parámetros que definen las funciones de costes en los arcos está basado en la experiencia de los planificadores. Este tipo de modelos es nuevo en la literatura.

Tipo II: Modelos de gestión del transporte. El objetivo de estos modelos es modificar la red de transporte existente, implementando nuevas políticas o modificando la actual red de transporte. Esta familia también es muy extensa y requiere una mayor especificación de los modelos. SE pueden considerar tres grandes subfamilias de modelos.

- Problema de diseño de redes. El objetivo del modelo es diseñar la nueva red de transporte, definida a través de un conjunto de arcos que representan nuevas vías o nuevos servicios de transporte público, o se desea cambiar las capacidades de las vías existentes.
- Problema de tarificación de la gestión. Estos modelos persiguen obtener sistemas de gestión y de optimización de parejas de modo que los usuarios se vean incentivados a emplear el transporte público, o a reducir el uso del vehículo privado en algunas partes de la red como por ejemplo en el centro de las ciudades o en los casos históricos.
- Problema de regularización semafórica. Estos modelos persiguen obtener la regulación semafórica óptima atendiendo al comportamiento de los usuarios frente a estas decisiones.

Los modelos tradicionales de planificación de transporte emplean datos obtenidos mediante la realización de grandes encuestas de movilidad, cuyo coste económico y humano es muy elevado. La motivación perseguida en el desarrollo de los modelos de tipo I se basa en emplear toda la información disponible y hacer viable métodos de estimación de parámetros a partir de información económica y fácil de obtener como son los aforos, la red.

La motivación de los modelos de tipo II es diferente. Estos modelos asumen que se dispone información completa de la parametrización de la red y lo que persiguen es



generar automáticamente la política óptima. Tradicionalmente el planificador de la red de transporte empleaba el modelo de equilibrio para evaluar diferentes intervenciones en la red que había generado con otros procedimientos. Estos modelos engloban simultáneamente estos dos procesos: el de generación de políticas y el de su evaluación.

Las técnicas o soluciones algorítmicas utilizadas para la resolución de los modelos binivel planteados, ya sea con el propósito de gestión/diseño o de estimación de parámetros/matrices, planteados hasta el momento por la comunidad científica en el terreno de las metodologías para problemas de transporte, difícilmente pueden encuadrarse dentro los métodos generales propuestos para la resolución de problemas de programación binivel, programación jerárquica o programación con restricciones de equilibrio que pueden encontrarse en referencias recientes tales como el texto de Bard (1998).

Una dificultad añadida, es la gran dimensión de estos problemas en las aplicaciones reales. Por ejemplo, si se considera la estimación de matrices O-D en las redes de de una gran ciudad, el número de variables del nivel inferior serían del orden de millares, y el número de variables en el nivel superior del orden de las decenas de millar. En otro tipo de aplicaciones el número de variables en el nivel superior varía entre unas decenas a varios miles. Otra forma de entender el coste computacional es observando que la evaluación de la función objetivo puede llevar algunos minutos, debido a que tiene que resolver un problema de optimización de miles de variables. Esto ha hecho que en la actualidad no se han implementado algoritmos exactos para problemas reales de gran escala. Casi la totalidad de los algoritmos desarrollados son heurísticos y son escasas las pruebas computacionales realizadas en problemas de gran escala.

El algoritmo heurístico más extendido para problemas de tipo II es el denominado algoritmo iterativo de optimización-asignación. Una iteración de este problema tiene dos fases. En la primera se resuelve el problema del nivel inferior (problema de asignación en equilibrio) y en la segunda se resuelve el problema del nivel superior (problema de optimización) considerando que las variables nivel inferior están fijadas a los valores encontrados en la primera fase.

Otra clase de algoritmos heurísticos están basados en el análisis de sensibilidad de los parámetros. Mediante el análisis de sensibilidad se constituye una aproximación lineal



del problema del nivel inferior en un punto determinado que reemplaza al problema inferior, lo que conduce a un problema de un solo nivel, cuya solución proporciona el próximo punto donde repetir el proceso. Esta clase de algoritmos heurísticos es conocida como formulación implícita.

Los problemas de tipo I fueron abordados inicialmente por Spiess (1990) proponiendo un método heurístico de gradiente para resolver el problema bi-nivel, método que aunque de débil base teórica proporciona buenos resultados prácticos.

Estos métodos heurísticos no tienen en cuenta la falta de diferenciabilidad del problema incluso en la situación favorable que se presenta cuando el problema de nivel inferior (problema de asignación) presenta unicidad de soluciones. Estas técnicas se basan en la evaluación de las proporciones de uso de los arcos por las relaciones O-D de la red.

Se han empleado métodos de búsqueda probabilística como el simulado recocido. Este método requiere de numerosas evaluaciones del nivel inferior, esta desventaja es aprovechada para hacer una resolución muy eficiente del nivel inferior.

Finalmente existen otros tipos de algoritmos, como en Abdulaal y LeBlanc (1979) que aplican el algoritmo de *Hooke-Jeeves* al problema de diseño de redes. Codina y Montero (2003) han desarrollado un método computacionalmente eficiente basado en la regularización de la función de nivel superior para aproximar direcciones contenidas en el gradiente generalizado de Clarke para el caso en que el problema de asignación es separable y diagonal. Este método permite la utilización de algoritmos de descenso y es consistente con la no diferenciabilidad del problema, estando en curso la existencia de dicho método para el caso de la asignación asimétrica general formulada en el terreno de las desigualdades variacionales.

4.7. ALGORITMOS PARA EL PROBLEMA DE DISEÑO DE REDES.

Dadas las dificultades existentes para resolver el problema de diseño de redes, varios algoritmos, muchos de ellos de tipo heurístico, han sido desarrollados para tratar de producir soluciones aceptables, sin garantizar necesariamente la optimalidad de tales soluciones.



En la formulación del problema de diseño de redes de transporte, la función objetivo a plantear puede que incluya términos que no disponen de una expresión analítica en función de las variables de decisión del problema y, por lo tanto, no son diferenciables. Como consecuencia de esto, la función objetivo tampoco lo es. Esta situación obliga a emplear métodos de solución que no requieran de una expresión analítica del gradiente de dicha función.

Dentro de estos métodos se encuentra el algoritmo de Hooke-Jeeves, entre cuyas ventajas destacan el no exigir ningún atributo especial de la función objetivo. El algoritmo no requiere convexidad de la función ni una expresión analítica explícita de las derivadas de dicha función con respecto a las variables de decisión del problema. Sí requiere que la función sea continua y evaluable para cualquier valor factible de las variables.

Otro de los métodos de solución que no requieren de una expresión analítica del gradiente de la función objetivo del problema de diseño es el algoritmo EDO (Equilibrium Decomposite Optimization). Esta heurística permite encontrar buenas soluciones para problemas de optimización de gran complejidad, donde la solución óptima es difícil (o imposible) de encontrar, pero la función objetivo es separable en las variables de optimización.

El tercer algoritmo es Simulated Annealing (SA), un tipo de algoritmo de búsqueda probabilística que ha resultado efectivo para resolver problemas matemáticos no convexos, de gran tamaño. SA es una especie de método de descenso que permite aceptar al azar algunas direcciones inferiores, es decir, que no mejoran la función objetivo.

El último algoritmo corresponde a Lagrangeano Aumentado. Es uno de los métodos eficientes y localmente convergentes utilizados para resolver problemas de optimización con restricciones no-lineales. En este caso, el algoritmo es utilizado para definir un método de solución para el problema de diseño de redes de transporte público.

**PARTE III: PROPUESTA DE MODELO
MACROSCÓPICO DE OPTIMIZACIÓN BINIVEL
DE UBICACIÓN Y ESPACIAMIENTO DE
PARADAS DE BUS**

Capítulo 5

***DESCRIPCIÓN GENERAL DEL MODELO
MACROSCÓPICO PROPUESTO***



CAPÍTULO 5. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL MODELO MACROSCÓPICO PROPUESTO.

5.1. INTRODUCCIÓN.

En el momento en que se quiere modificar la ubicación de las paradas de bus en una trama urbana, se están variando las condiciones iniciales sobre las que los viajeros de todo el sistema toman sus decisiones de elección de modo. La ubicación de una parada en una zona donde actualmente no existe puede dar lugar a captar nuevos usuarios del transporte público que antes carecían del servicio.

Asimismo, en el caso del diseño de un nuevo sistema de transporte público en una ciudad que carece del mismo, la ubicación de las paradas forma parte en gran medida de la “atractividad” del servicio y de su potencialidad para captar viajeros.

Para la resolución del problema de localización de paradas se plantea un Modelo matemático de Optimización Binivel, compuesto de un nivel superior que minimiza una función de costes tanto de usuarios como del operador (coste social), y un nivel inferior en el que se incluye un modelo de partición modal-asignación teniendo en cuenta la influencia del tráfico privado y la congestión en los vehículos de transporte público.



El modelo aquí presentado tiene como punto de partida las investigaciones realizadas por dell'Olio (2005) en su tesis doctoral, continuando con varias de las líneas de investigación que el autor propone.

El coste social total involucrado en la operación del sistema de transporte incluirá los costes de producir los servicios, los costes de viaje (percibidos por los usuarios del sistema), y el coste de construcción de las paradas.

Suponiendo definido el trazado de las líneas, existen entonces dos tareas importantes a realizar, y que afectan de manera determinante el funcionamiento del sistema de transporte público. Por un lado, regular las operaciones, y por otro, dar al sistema una cobertura en términos de demanda que proporcione un buen servicio al usuario sin generar costes muy elevados.

En particular esto afecta tanto a las frecuencias como al número de paradas de bus, habida cuenta de que son dos variables que están fuertemente interrelacionadas y que tienen una incidencia elevada en los costes sociales de operación.

Por lo tanto, el problema fundamental que se pretende resolver consiste en encontrar un equilibrio entre lo que es el óptimo para la oferta y lo que sería óptimo para el usuario. Su solución no es sencilla, ya que en la mayor parte de las ocasiones estos intereses son contrapuestos.

De hecho, para el usuario sería conveniente tener la parada muy cerca de su casa y que los buses pasasen con más frecuencia. Para los operadores, por el contrario, esta opción le causaría un incremento significativo de los costes de operación.

También es cierto que si cada usuario tuviera una parada próxima a su casa, acabaría afectando en su coste generalizado de transporte ya que se produciría un incremento considerable de los tiempos de viaje. Al contrario, un número limitado de paradas acabaría favoreciendo a los operadores en cuanto a que disminuirían los costes de operación, y perjudicaría a los usuarios de transporte público, los cuales verían aumentar el tiempo de acceso al sistema. Todo esto podría transformarse en un incentivo para los usuarios del transporte público a pasar a utilizar el vehículo privado.



Por lo tanto, en el presente trabajo se procede a modelar el sistema completo para encontrar una solución de equilibrio que permita resolver los problemas antedichos.

Dadas las dificultades existentes para resolver este problema, en relación a la unicidad de la solución, se propone un algoritmo de tipo heurístico para generar soluciones adecuadas, utilizando algoritmos de búsqueda eficiente para alcanzar soluciones factibles, sin alcanzarse necesariamente el óptimo.

5.2. HIPÓTESIS BÁSICAS.

Este estudio tiene por lo tanto como principal objetivo determinar el distanciamiento óptimo entre paradas de bus en toda la red de transporte público. Las hipótesis principales son las que siguen:

1. Se ha definido a priori el trazado de las líneas (no se modifica).
2. Se conocen las velocidades medias en los tramos en que se ha dividido la red de transporte público.
3. Se conoce la frecuencia y/o intervalos de las líneas de transporte público.
4. Se conoce la demanda global que realiza sus viajes en los modos de transporte motorizados entre cada par origen destino en el intervalo de tiempo modelado (matriz O-D).
5. Se fija una serie de puntos obligados a ser puntos de parada tales como cabeceras de líneas o cualquier punto estratégico de la ciudad que se quiera dar cobertura.
6. Se define una serie de áreas de la red, teniendo asignadas determinadas características comunes de forma que a cada una de ellas se le asigna un determinado valor de partida de distanciamiento entre paradas.

En lo que se refiere a la demanda de viajes, se considera oportuno considerar la de la hora punta. De hecho, el distanciamiento entre paradas no es fácilmente modificable a lo largo del día, por esto es importante que sea lo más adecuado posible en las horas más críticas del día.



Respecto a los puntos que pueden o no ser parada, se han seguido las siguientes indicaciones:

- a. Se consideran como candidatos a puntos de parada, aquellos en los que se prevé importantes concentraciones de potenciales viajeros, como puede ser el caso de demandas originadas en centros comerciales, hospitales, colegios, etc. así como en las proximidad de puntos de intersección de dos o más líneas, o cerca de parking (para favorecer el park and ride).
- b. La parada debe ser visible, especialmente para los Buses que se acercan a ella; la visibilidad no debe de ser obstruida por árboles, edificios u obstáculos varios.
- c. La pendiente longitudinal de la calle en la sección alrededor de la parada de Bus no debe ser más grande del 4 %, para evitar problemas a los Buses a la hora de dejar la parada en las maniobras de arranque y disminuir los niveles de ruido, etc.

El problema de diseño del sistema de transporte público urbano puede ser concebido como un juego no cooperativo de dos niveles (Juego de Stakelberg). En este juego participan el planificador, que determina las características del sistema de transporte, y los usuarios del sistema, que tienden a minimizar su coste generalizado de viaje, produciendo un patrón de flujos sobre este sistema. En el coste generalizado de viaje se encuentran todos los elementos que un individuo valora a la hora de realizar un viaje, como el tiempo de caminata para acceder al sistema de transporte, el tiempo de espera, el tiempo de viaje en vehículo, la comodidad del viaje, la tarifa, la seguridad etc.

En el primer nivel, en primera instancia, el planificador define la estructura topológica de los servicios, estableciendo los trazados y las tecnologías de transporte público a utilizar para cada servicio (problema de diseño físico). En una segunda etapa el planificador determina las características operacionales del sistema, como ubicación de las paradas, frecuencias y capacidad para cada servicio (problema de diseño operacional). Estas dos últimas vienen dadas en el problema. En el segundo nivel se encuentran los usuarios del sistema, los cuales reaccionan frente a esta estructura de servicios generando un perfil de flujos sobre dichos servicios de transporte público propuestos. Este segundo nivel esta modelado normalmente a través de un modelo de



comportamiento, que permite predecir la asignación de los usuarios a la estructura de transporte analizada. (Norambuena, 2002).

El objetivo del problema a resolver es la minimización del coste total involucrado en el sistema de transporte, el que se incluirán los costes de producir los servicios (percibidos por los operadores de transporte público) y los costes de viaje (percibidos por los usuarios del sistema de transporte tanto público como privado).

En lo que se refiere a la localización de paradas de buses, se utilizará un enfoque discreto que se aproximará al continuo, es decir, se considerarán todos los posibles puntos candidatos susceptibles de ser paradas, salvo determinadas restricciones impuestas por el modelador. La elección de este tipo de enfoque se justifica porque permite obtener resultados lo más cercano posible a la realidad, ya que, como se sabe, no todos los puntos de una línea de transporte público son idóneos para localizar las paradas, ya sea por falta de espacio o por restricciones normativas que serían muy difíciles de modelar en el caso de considerar un enfoque continuo.

5.3. ESTRUCTURA.

Tal y como se ha expuesto al inicio de este capítulo, la estructura del modelo viene determinada por una función objetivo de costes sociales en el nivel superior, sometida a varias (o ninguna) restricciones operacionales (que deben ser decididas por el modelador). Por su parte, la función objetivo del nivel inferior viene representada por una desigualdad variacional que resuelve simultáneamente el problema de partición modal-asignación cuya solución serán los flujos y tiempos invertidos por los usuarios y los vehículos en cada modo de transporte público.

Básicamente la estructura del modelo obedece al diagrama representado en la figura 5.1:

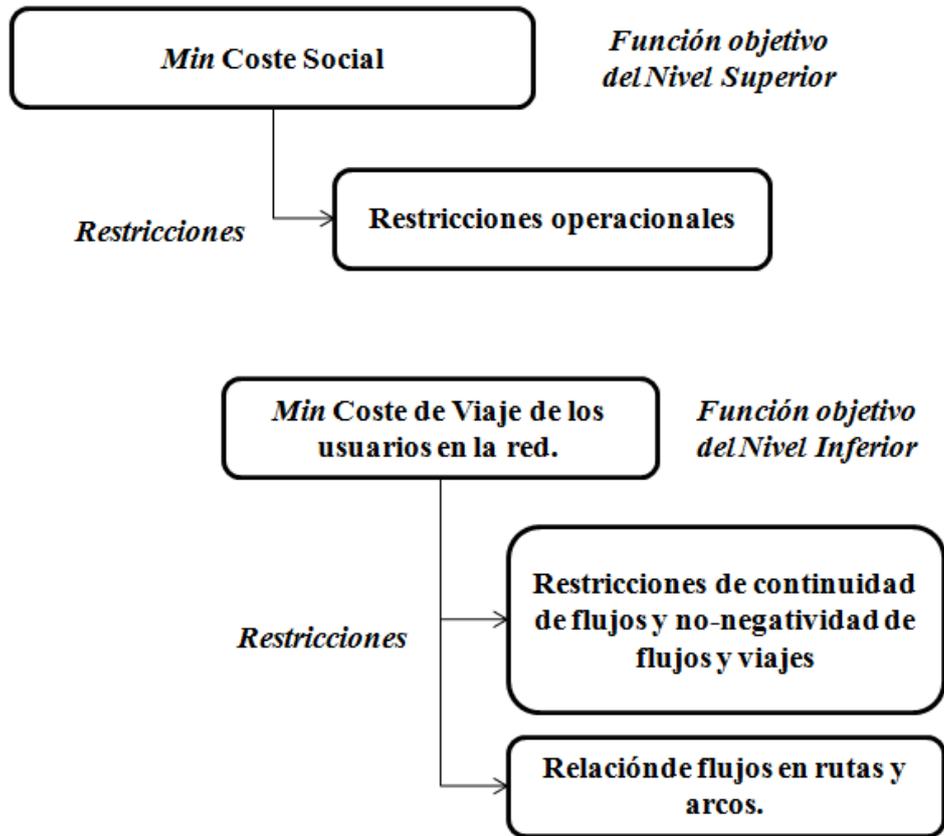


Fig. 5.1.- Estructura del modelo propuesto.

Capítulo 6

NIVEL SUPERIOR: MODELO DE COSTES PROPUESTO



CAPÍTULO 6. NIVEL SUPERIOR: MODELO DE COSTES PROPUESTO.

6.1. INTRODUCCIÓN.

La función objetivo del nivel superior se basa en una estructura de costes en la que se distinguen los costes de operación del sistema de transporte público (C_o), el coste del usuario del transporte público (C_u), el coste de construcción de las paradas (C_c) y el coste de los usuarios del transporte privado (C_a). Se obtiene así una *Función de Coste Social*, cuya estructura está esquematizada en la figura adjunta (Figura 6.1).

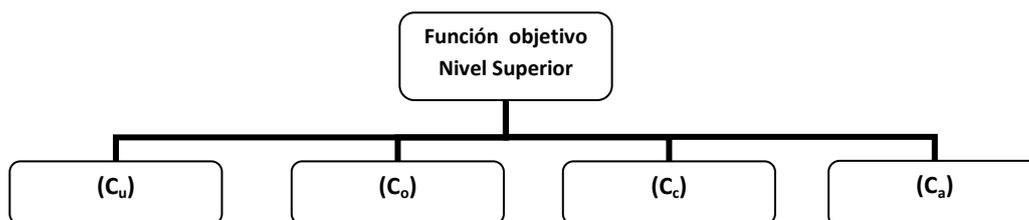


Fig. 6.1.- Estructura de costes

Al ser una función de minimización de costes totales, la función a minimizar puede expresarse como:

$$\min C_u + C_o + C_c + C_a \quad (6.1)$$



Como se ha expuesto en el capítulo anterior, los cálculos se realizarán en períodos de simulación de una hora, tomando como referencia la hora punta, por lo que los costes a los que esta función se refiere serán costes por hora.

6.2. COSTE DEL USUARIO DEL TRANSPORTE PÚBLICO.

Los costes de los usuarios del transporte público serán los percibidos por éstos debidos a los tiempos invertidos en la realización de sus viajes. Si se asume la tarifa en el transporte público constante, el coste de un usuario que quiere viajar en bus desde una zona origen O a otra zona destino D se puede descomponer en:

- Tiempo medio de acceso desde su lugar de origen (modelizado por el centroide de la zona O) hasta la parada de bus más cercana que le sirva para realizar el viaje.
- Tiempo de espera hasta la llegada del bus que le sirva para hacer su desplazamiento y que a su vez disponga de espacio y pueda ser abordado.
- Tiempo de viaje hasta la parada final de su trayecto.
- Tiempo de acceso desde la parada final hasta el lugar de destino (también modelizado por el centroide de la zona D).

Durante el trayecto, puede suceder que se deba realizar uno o varios transbordos (sin suplemento de tarifa) con lo que se producen nuevos tiempos de espera, de viaje y de acceso si necesita realizar un desplazamiento para abordar otra línea que no pare en la misma parada, con la incomodidad que ello representa.

Siguiendo esta estructura de viaje, y teniendo en cuenta que el tiempo total invertido en el mismo es la suma de los tiempos de cada etapa, el coste de usuario puede expresarse como:

$$C_u = \phi_a TAT + \phi_w TWT + \phi_v TIVT + \phi_t TTT \quad (6.2)$$

Donde:

TAT = Tiempo Total de Acceso (h).

TWT = Tiempo Total de Espera (h).



$TIVT$ = Tiempo Total de Viaje en bus (h).

TTT = Tiempo Total de Traslado (h).

ϕ_a = Valor del tiempo de acceso (€/h).

ϕ_w = Valor del tiempo de espera (€/h).

ϕ_v = Valor del tiempo de viaje en bus (€/h).

ϕ_t = Valor del tiempo de traslado (€/h).

Tal y como se ha expuesto en el capítulo anterior, del problema del nivel inferior se obtienen los flujos sobre la red vial de transporte público y privado mediante un modelo combinado de partición modal-asignación. De la asignación a transporte público resultante se obtendrán los tiempos de acceso, espera, viaje y traslado que serán los input de la función de costes del usuario de transporte público.

La metodología seguida en este modelo combinado de partición modal-asignación y la obtención de los valores necesarios se tratan en detalle en el capítulo siguiente.

6.3. COSTES DE OPERACIÓN DEL TRANSPORTE PÚBLICO.

Los costes de operación del transporte público corren a cuenta del operador del mismo y 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).
- Costes horarios debidos al ralentí (CR).
- Costes de personal (CP).
- Costes fijos (CF).

Los Costes Indirectos (CI) engloban, entre otros, los siguientes costes:

- Costes generales: administración, estructura, marketing, publicidad, otros.
- Costes comerciales: Personal venta al público, comisiones, electricidad, correo, otros.

En base a Ibeas et al., (2006) se pueden suponer del orden del 12% de los Costes Directos.

Por lo tanto, la estructura general de costes de operación se puede expresar como:

$$C_o = CD + CI \Rightarrow 1.12 \cdot CD \Rightarrow 1.12 \cdot (CK + CR + CP + CF) \quad (6.3)$$

El coste total de los kilómetros recorridos será función de la longitud de cada línea de transporte público, del número de servicios durante la hora de simulación y del tipo de autobús que se disponga en cada servicio. Con esto, el coste de rodadura (CR) será igual a:

$$CK = \sum_l \sum_k L_l \cdot f_l \cdot Ck_k \cdot \delta_{l,k} \quad (6.4)$$

donde:

L_l = Longitud de la línea l (km).

f_l = frecuencia de la línea l (bus/h).

Ck_k = coste unitario por kilómetro de rodadura del autobús tipo k (€/km).

$\delta_{l,k}$ = variable binaria que toma valor 1 si la línea l tiene un autobús tipo k y 0 en caso contrario.

El coste de los autobuses en ralentí (CR) será función del tiempo que éstos estén detenidos con el motor en marcha, con lo que, simplificando, se computan los tiempos de detención en paradas de bus debidos a la carga y descarga de viajeros. Por lo tanto, se puede expresar como:

$$CR = \sum_k \left(\sum_l \sum_n TBS_{l,n} \right) \cdot Cr_k \cdot \delta_{l,k} \quad (6.5)$$

donde:

$TBS_{l,n}$ = tiempo total de parada del bus de la línea l en la parada n .

Cr = coste horario en ralentí del autobús (€/h).

Por su parte, en una primera aproximación, la demora en cada parada de bus (TBS) estará relacionada con la demanda de cada línea l en cada parada n :

$$TBS_{l,n} = \left[\max(Y_{l,n} \cdot t_s; X_{l,n} \cdot t_b) + (t_{o,c}/60) \cdot f_l \right] \quad (6.6)$$

donde:

t_s = tiempo promedio de subida de los pasajeros (h).

t_b = tiempo promedio de bajada de los pasajeros (h).

$Y_{l,n}$ = demanda de viajes de la línea l y origen en la parada n que se obtiene de la asignación (pax/h).

$X_{l,n}$ = demanda de viajes de la línea l y destino la parada n que se obtiene de la asignación (pax/h).

$t_{o,c}$ = tiempo promedio perdido de apertura y cierre de puertas y en las maniobras de entrada y salida del área de parada por cada bus (min).

El coste de personal se considera directamente proporcional al número de autobuses en servicio en la hora punta, que a su vez será función del tiempo de ciclo de cada línea entre su intervalo:

$$CP = Cp \sum_l \text{round}^+ (tc_l/h_l) \quad (6.7)$$

donde:

Cp = es el coste unitario por hora del personal (€/bus).

tc_l = es el tiempo de ciclo de la línea l (min).

h_l = intervalo de la línea l (min).

Los costes fijos se calculan con la siguiente formulación considerando los autobuses que están circulando:

$$CF = \sum_l \sum_k \text{round}^+ (tc_l/h_l) \cdot C_{f_k} \cdot \delta_{l,k} \quad (6.8)$$

donde:

C_{fk} = es el coste fijo por hora del bus tipo k.

6.4. COSTE DE CONSTRUCCIÓN DE LAS PARADAS.

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 todo caso, su incorporación al modelo no sería más que añadir un término de coste por cada parada en la función objetivo, multiplicado por el número de nuevas paradas.

$$C_c = \sum_l m_l \cdot c_m \quad (6.9)$$

Donde:

m_l = número de paradas en la línea l .

c_m = coste de construcción de cada parada.

6.5. COSTE DEL USUARIO DEL TRANSPORTE PRIVADO.

El coste del usuario del transporte privado representa como única variable el tiempo de viaje entre origen y destino más un tiempo de acceso desde el origen a la red y desde ésta al destino, que se considera constante en cuanto a que las variables de decisión del problema no afectan al acceso a la red de estos usuarios.

Bajo esta premisa, y dentro de este enfoque macroscópico, los usuarios del transporte privado experimentarán tiempos de viaje que serán función de los tiempos de recorrido en el vial o arco de la red.

Estos tiempos serán función del flujo de vehículos circulando en el arco, la capacidad del mismo y las condiciones de velocidad especificada en cada vía. Así, el tiempo de viaje para un usuario de transporte privado que pretenda ir de un origen O a un destino D siguiendo una ruta p será:

$$TV_{O-D}^p = \sum_a tv_a (V_a) \cdot \delta_a^p \Rightarrow \sum_a \left(tv_0 \cdot \left(1 + \alpha \cdot \left(\frac{V_a}{K_a} \right)^\beta \right) \right) \cdot \delta_a^p \quad (6.10)$$

donde:

tv_0 = tiempo de viaje a flujo libre en el arco a (horas).

V_a = flujo en el arco a (veh/h).

K_a = capacidad del arco a (veh/h).

α, β = parámetros de calibración.

δ_a^p = variable binaria que toma valor 1 si el arco a pertenece a la ruta p y 0 en caso contrario.

Por lo tanto, asumiendo que el tiempo de viaje será resultante de una asignación de equilibrio de usuarios, el coste de los usuarios del transporte privado será:

$$C_a = \phi_v \cdot \left(\sum_w \overline{TV}_w \cdot T_w \right) \quad (6.11)$$

donde:

\overline{TV}_w = tiempo de viaje en equilibrio para el par O-D w (h).

T_w = demanda de viajes en transporte privado en el par O-D w .

ϕ_v = valor del tiempo de viaje en auto (€/h).

6.6. FUNCIÓN OBJETIVO DEL NIVEL SUPERIOR: FUNCIÓN DE COSTES

En base a estas estructuras de costes expuestas, queda definido el problema de optimización al nivel superior, consistente en la minimización de los costes hasta aquí planteados sometido a las restricciones operacionales que se deseen considerar.

Parece evidente a priori, que a medida que aumenta el número de paradas de bus disminuye el tiempo de acceso del usuario de transporte público y aumenta el coste de operación en cuanto a que el tiempo de ciclo puede aumentar requiriendo un aumento de flota o una variación de las frecuencias. Es por eso por lo que estas restricciones operacionales pueden ser tales como presupuesto máximo del operador, tamaño de flota máximo o frecuencias ofertadas máximas y mínimas, que son las mostradas respectivamente en el conjunto de restricciones 6.13



$$\begin{aligned}
 \min \quad Z = & (\phi_a TAT + \phi_w TWT + \phi_v TIVT + \phi_l TTT) + \\
 & +1.12 \cdot \left[\left(\sum_l \sum_k L_l \cdot f_l \cdot Ck_k \cdot \delta_{l,k} \right) + \left(\sum_k \left(\sum_l \sum_n TBS_{l,n} + \sum_l Tc_l \right) \cdot Cr_k \cdot \delta_{l,k} \right) + \right. \\
 & \left. + \left(Cp \sum_l \text{round}^+(tc_l/h_l) \right) + \left(\sum_l \sum_k \text{round}^+(tc_l/h_l) \cdot C_{f_k} \cdot \delta_{l,k} \right) \right] + \quad (6.12) \\
 & + \left(\sum_l m_l \cdot c_m \right) + \phi_v \cdot \left(\sum_w \overline{TV}_w \cdot T_w \right)
 \end{aligned}$$

s.a.

$$\begin{aligned}
 C_o & \leq C_o^{\max} \\
 \sum_l \text{round}^+(tc_l/h_l) & \leq fls_{\max} \\
 F_{\min} & \leq f_l \leq F_{\max}, \quad \forall l
 \end{aligned} \quad (6.13)$$

Capítulo 7

***NIVEL INFERIOR: MODELO MACROSCÓPICO DE
COMPORTAMIENTO DEL USUARIO***



CAPÍTULO 7. NIVEL INFERIOR: MODELO MACROSCÓPICO DE COMPORTAMIENTO DEL USUARIO.

7.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describe el modelo combinado de partición modal-asignación que constituye la función objetivo del nivel inferior (de Cea et al., 2003).

Este modelo se aplica sobre una red de transporte, que constituye la red vial sobre la cual se ofertan además una serie de servicios de transporte público con unas determinadas características.

En base a dichas características de cada modo de transporte, el usuario deberá escoger un modo para realizar su desplazamiento, por ello es importante calibrar un modelo de comportamiento del usuario de cara a modelizar esta elección modal así como la ruta escogida.

Los modelos de comportamiento permiten simular las decisiones de viaje de los usuarios del sistema de transporte y determinar los flujos (pasajeros y vehículos) de equilibrio sobre las redes correspondientes.



En efecto, el diseño de la red de transporte público puede afectar varios niveles de decisión de los usuarios, a saber: elección de modo y elección de ruta (se supone que los cambios en las paradas no afectan a la distribución de viajes). De esta forma, los flujos de equilibrio deberán ser determinados utilizando un modelo de partición modal-asignación (incorporado en el modelo ESTRAUS – SECTU (1989) (www.estraus.com)) o solamente asignación a la red, dependiendo del caso.

En las dos secciones que siguen se explican en detalle los modelos de comportamiento mencionados.

7.2. EQUILIBRIO SIMULTÁNEO PARTICIÓN MODAL-ASIGNACIÓN.

En este modelo se asume que la etapa de generación de viajes es exógena, es decir, las generaciones y atracciones de viajes son datos de entrada al modelo. Asimismo, la distribución de la matriz O/D también es fija: se sabe, para el período de simulación, la demanda entre cada par Origen-Destino.

Las interacciones de congestión entre todos los vehículos que utilizan la red vial son explícitamente consideradas, dado que todos ellos compiten por la misma capacidad. La excepción son las vías exclusivas para buses y las líneas de metro que operan sobre una red independiente.

Las redes de transporte público incluyen una detallada representación del sistema y se considera restricción de capacidad de los vehículos que operan los servicios.

A continuación se proporcionan definiciones básicas relativas al modelo, como aquellas correspondientes a las redes y las funciones de coste utilizadas. En base a estos conceptos, se plantea el problema de optimización resultante, que el algoritmo resuelve para encontrar la solución buscada. En el Anexo I, se demuestra que el modelo matemático planteado, resuelto mediante el algoritmo descrito, da solución al problema de Partición Modal – Asignación, entregando resultados consistentes con los modelos de comportamiento asumidos.

7.2.1. REDES Y FUNCIONES DE COSTE

Red y funciones de coste de transporte privado.

La red vial está representada por un grafo $G(N,A)$, donde N es el conjunto de nodos y A el conjunto de arcos. Se define $c_a^{kp\tilde{m}}$, coste medio de operación en el arco a para usuarios de clase k , con propósito de viaje p , del modo de transporte privado \tilde{m} , como una función de la suma de los flujos vehiculares de usuarios de todos los modos de transporte privado, de todas las categorías de usuarios y propósitos de viaje ($f_a^{kp\tilde{m}}$) y del flujo fijo de vehículos de transporte público (\bar{F}_a), en vehículos equivalentes, para el arco a :

$$c_a^{kp\tilde{m}} = c_a^{kp\tilde{m}} \left(\sum_k \sum_p \sum_{\tilde{m}} f_a^{kp\tilde{m}}, \bar{F}_a \right) \quad (7.1)$$

Se considera que la función de coste en el arco a , según categoría de usuario k , tiene una sola componente relacionada con la congestión sobre el arco a , que depende del flujo y la capacidad del arco, y que se representa como una función del tipo BPR ya expuesta en la ecuación (6.10).

Se considera la existencia de simetría en los efectos de interacción de congestión en la red vial entre usuarios de distintas categorías, lo que puede conceptualizarse como que “el impacto marginal producido por un usuario de categoría n sobre los costes de los usuarios de categoría k es idéntico al producido por un usuario de categoría k sobre los costes de los usuarios de categoría n ”.

Es importante notar que, aunque el Jacobiano del vector de funciones de coste es no diagonal, dada la forma supuesta para las funciones $c_a^{kp\tilde{m}}$, éste resulta ser simétrico (todos los vehículos de los modos de transporte privado, cualquiera sea la categoría de usuarios, el propósito del viaje y el modo, producen igual impacto en la congestión).

Red y funciones de coste de transporte público.

La red de transporte público, $\bar{G} = (\bar{N}, L)$, consta de un conjunto de nodos \bar{N} , subconjunto de N , y un conjunto de líneas de transporte público L , cada una de las cuales está definida por una secuencia de nodos donde los pasajeros pueden subir o bajar de la línea.

Para cada modo \bar{m} de transporte público, se definen redes de servicios $G_{\bar{m}}(N_{\bar{m}}, S_{\bar{m}})$, donde $N_{\bar{m}}$ es el conjunto de nodos y $S_{\bar{m}}$ el conjunto de *arcos de transporte público* (secciones de ruta) para el modo \bar{m} . Una sección de ruta es una porción de una ruta entre dos nodos de transbordo consecutivos, y tiene asociado un conjunto de líneas igualmente *atractivas* para los usuarios (ver De Cea y Fernández, 1993).

Para ilustrar esta definición considérense dos nodos A y B tales que existe un conjunto L_1 de servicios de transporte público que permiten llegar a B desde A , sin realizar transbordos ($L_1 = \{l_1, l_2, l_3, \dots, l_n\}$). Esto es, entre A y B opera un conjunto de *secciones de línea* (tramo de una línea entre dos nodos no necesariamente consecutivos de su trazado), como se observa en la siguiente figura:

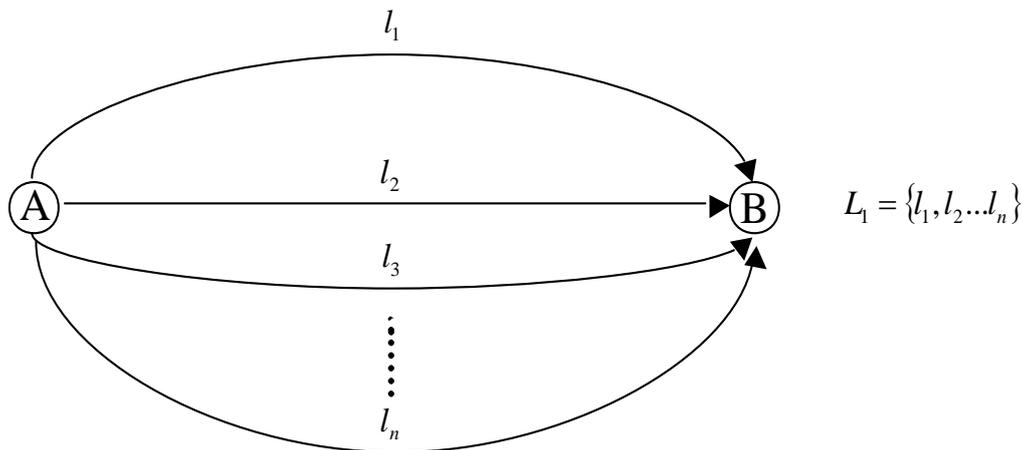


Fig. 7.1.- Secciones de Línea entre Dos Nodos (Barquin, 2001).

Para representar el hecho que los viajeros seleccionan un subconjunto de las líneas de L_1 (subconjunto de líneas *atractivas*) para desplazarse desde A a B , y al mismo tiempo tomar en cuenta la restricción de capacidad de los vehículos, la situación anterior se modela de la siguiente forma:

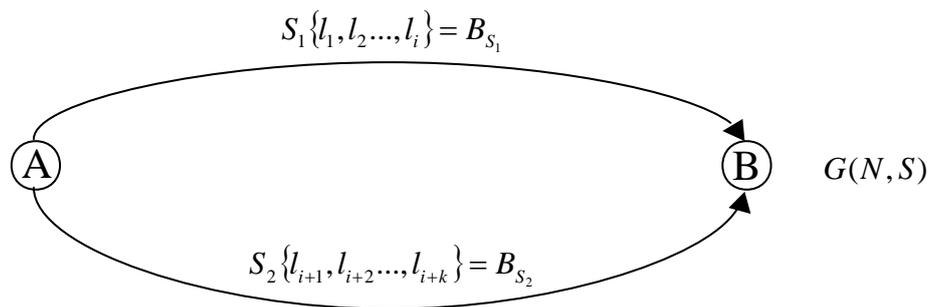


Fig. 7.2.- Arcos de Transporte Público Red (Barquin, 2001).

El primer *arco de transporte público*, S_1 , representa el conjunto de *líneas rápidas*, B_{S_1} , y corresponde al conjunto de líneas que permite minimizar el tiempo (coste) generalizado de viaje sin considerar restricción de capacidad de los vehículos, es decir, el conjunto de líneas comunes determinadas mediante el algoritmo de Chriqui (ver Chriqui, 1974, y Chriqui y Robillard, 1975). El segundo arco de transporte público, S_2 , representa el conjunto de *líneas lentas*, B_{S_2} .

Por lo tanto, en la red de transporte público puede existir más de un arco (sección de ruta) uniendo un par de nodos dado. El primer arco, como se mencionó más arriba, contiene las líneas "más rápidas" del total de líneas que unen ese par de nodos (conjunto de líneas comunes). Si existen líneas que no han sido incluidas en este conjunto, se aplica nuevamente el algoritmo de Chriqui y se crea un segundo arco, paralelo al anterior, que contiene el nuevo conjunto de líneas comunes.

El proceso continúa hasta que todas las líneas que unen el par de nodos estén asociadas a alguna sección de ruta. A medida que las secciones de ruta que contienen las líneas "más rápidas" se congestionan, comienzan a ser atractivas para los usuarios aquellas secciones de ruta formadas por las líneas "más lentas".

En rigor, sólo al conocer las frecuencias de las líneas es posible determinar qué servicios exactamente pertenecen al conjunto de "líneas rápidas" y a los conjuntos de líneas "más lentas".

En general, el tiempo de espera que experimentan los pasajeros que abordan una determinada sección de ruta s , en su nodo origen $i(s)$, dependerá de:

- a) El número total de pasajeros que abordan la sección de ruta s , en el nodo $i(s)$ (V_s)
- b) El número total de pasajeros que abordan, en el nodo $i(s)$, todas aquellas otras secciones de ruta que utilizan líneas pertenecientes a la sección de ruta s (V_{is}^+)
- c) El número total de pasajeros que abordan todas las líneas que pertenecen a la sección de ruta s , en un nodo anterior a $i(s)$ y que se bajan en un nodo posterior a $i(s)$ en el recorrido de las líneas (V_{is}^-)

El flujo de pasajeros V_{is}^+ compite con V_s por la capacidad remanente de las líneas que pertenecen a la sección de ruta s en el nodo $i(s)$. En tanto que, el flujo de pasajeros V_{is}^- reduce dicha capacidad.

De esta forma, se puede definir el flujo total que compite con V_s por la misma capacidad de la siguiente forma:

$$\tilde{V}_s = \sum_{l \in A_s} \left(\sum_{r \in S_{is}^+} v_l^r + \sum_{r \in S_{is}^-} v_l^r \right) \quad (7.2)$$

$\begin{matrix} V_{is}^+ & & V_{is}^- \end{matrix}$

donde S_{is}^+ corresponde al conjunto de secciones de rutas que salen del nodo $i(s)$, con la excepción de la sección de ruta s , y S_{is}^- corresponde al conjunto de secciones de ruta que tienen nodo origen anterior a $i(s)$ y nodo destino posterior a $i(s)$.

Por lo tanto, el modelo asume la siguiente forma general para las funciones de coste de las secciones de ruta, donde el tercer término toma en cuenta explícitamente el efecto de congestión en el fenómeno de espera:

$$c_s = \bar{t}_s + \left(\frac{\chi}{f_s} \right) + \zeta \cdot \varphi_s \left(\frac{V_s + \tilde{V}_s}{K_s} \right) \quad (7.3)$$

donde \bar{t}_s es el tiempo de viaje en vehículo más la tarifa, f_s es la frecuencia total en la sección de ruta s , χ , ζ son parámetros de calibración y K_s es la capacidad de la sección de ruta s . La función φ_s debe ser tal que c_s sea estrictamente creciente en V_s , normalmente se usan funciones tipo BPR:

$$\varphi_s = \left(\frac{V_s + \tilde{V}_s}{K_s} \right)^n \quad (7.4)$$

De esta forma, el tiempo de espera aumentará a medida que \tilde{V}_s y/o V_s se acerquen a la capacidad total de la sección de ruta, K_s .

De la definición anterior de las funciones de coste es fácil ver que el Jacobiano del vector de dichas funciones no será, en general, simétrico. Como consecuencia de esto, el problema de asignación a redes congestionadas de transporte público es asimétrico y, por lo tanto, no es posible en principio plantear un problema de optimización equivalente.

7.2.2. CONDICIONES DE EQUILIBRIO

Equilibrio de Flujos.

El supuesto básico del modelo, respecto del equilibrio de flujos en las redes, es que para cada modo m , sobre su respectiva red, cada usuario elige su ruta de acuerdo al *primer principio de Wardrop* (cada individuo trata de minimizar su coste de operación o coste medio generalizado de viaje). Esto da lugar a las siguientes condiciones de equilibrio:

$$C_r^{kpm*} - u_w^{kpm*} \begin{cases} = 0 & \text{si } h_r^{kpm*} > 0 \\ \geq 0 & \text{si } h_r^{kpm*} = 0 \end{cases}; \quad \forall r \in P_w^m, w, k, p \quad (7.5)$$

donde:

C_r^{kpm*} = coste de equilibrio para la ruta mínima de la ruta r para usuarios de la clase k para el modo m .

u_w^{kpm*} = percepción del coste de operación de equilibrio en el modo m para par origen-destino w y ruta r para usuarios de la clase k .

h_r^{kpm*} = flujo de usuarios de clase k en el modo m , sobre la ruta r que pertenece al conjunto de rutas entre el par w para el modo m : P_w^m .



Lo anterior significa que, en el equilibrio, las rutas con flujos tienen costes iguales (coste mínimo) mientras aquellas que no tienen flujos presentan costes iguales o mayores que el coste mínimo $u_w^{kpm^*}$.

De acuerdo con las definiciones de las funciones de coste, tanto de transporte privado como de transporte público, y las condiciones de equilibrio (7.5), el submodelo de asignación es consistente con un equilibrio de usuario determinista.

Equilibrio de Viajes.

Antes de explicitar las condiciones de equilibrio para la demanda, la figura 7.3 ilustra una rama del árbol de decisión para un par origen-destino w dado, una clase de usuario k y un propósito de viaje p , para el caso particular de un modelo de partición modal - asignación.

En el caso de este ejemplo, desde el nivel más alto del árbol de decisión *cuelgan*, tantas ramas equivalentes a la representada en la figura, como combinaciones de pares origen-destino w , clases de usuario k y propósitos de viaje p , existan.

En el nivel superior de la rama en la figura, están representadas las decisiones de destino por propósito de viaje y clase de usuario, que son datos fijos y exógenos en este modelo; en el nivel inferior (en realidad en los dos niveles inferiores), se representan las decisiones de modo en una estructura logit de dos niveles.

En cada nivel de partición modal del árbol se muestra la función de utilidad (des-utilidad) correspondiente. En el nivel inferior, cada modo m tiene asociada una des-utilidad u_w^{kpm} (coste de viaje entre el par w para usuarios de clase k , propósito p y modo de transporte m). El conjunto de modos está agrupado en diferentes nidos (partición modal con estructura jerárquica de dos niveles), con des-utilidad V_w^{kpm} . El nivel superior es el correspondiente a la elección de destino, conocidos y exógenos (T_w^{kp}).

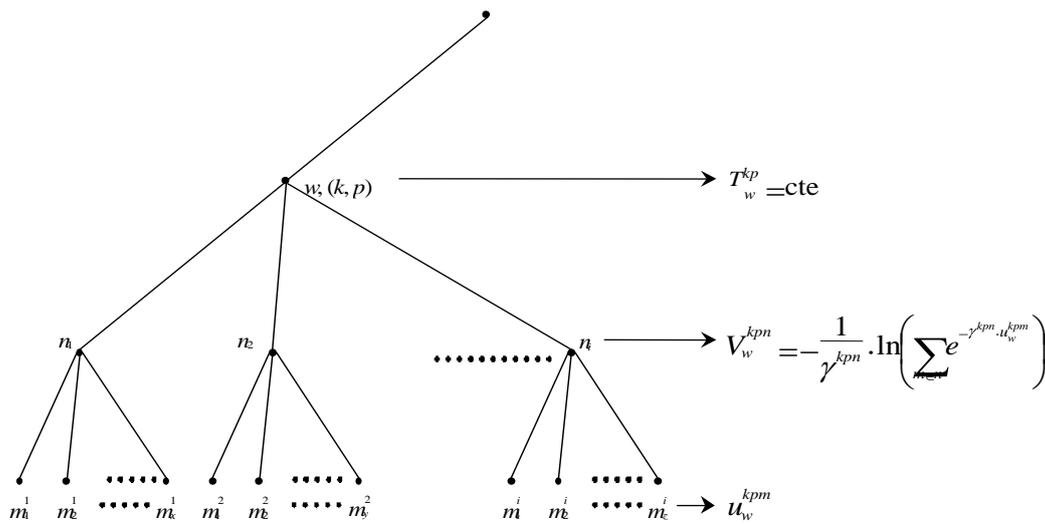


Fig. 7.3.- Ilustración del Árbol de Decisión del Modelo de Demanda (Barquin, 2001)

En el equilibrio, para este problema ejemplo, deben cumplirse las siguientes condiciones:

Proporción de viajes de un modo m dentro de un nido n

$$P_w^{kpm^*} = \frac{T_w^{kpm^*}}{T_w^{kpn^*}} = \frac{e^{-\gamma^{kpn} u_w^{kpm^*}}}{\sum_{m' \in n} e^{-\gamma^{kpn} u_w^{kpm'^*}}} \quad (7.6)$$

Proporción de viajes en nido n respecto del total de viaje

$$P_w^{kpn^*} = \frac{T_w^{kpn^*}}{T_w^{kp^*}} = \frac{e^{-\lambda^{kp} V_w^{kpn^*}}}{\sum_{n'} e^{-\lambda^{kp} V_w^{kpn'^*}}} \quad (7.7)$$

Por lo tanto, para un caso sencillo de dos modos de transporte modelizados con un logit Multinomial, los viajes entre el par w y modo m para el propósito de viaje p será:

$$T_w^{kpm} = T_w^{kp} \cdot P_w^{kpm} \quad (7.8)$$

7.2.3. FORMULACIÓN MATEMÁTICA DEL PROBLEMA.

Las condiciones de equilibrio anteriores para el problema que se considera, pueden formularse también mediante una desigualdad variacional del siguiente tipo:

$$c(X^*)^t(X - X^*) - g(T^*)^t(T - T^*) \geq 0, \quad \forall X, T \text{ factibles} \quad (7.9)$$

donde:

X : vector de flujos sobre los arcos de la red multimodal.

X^* : vector de flujos de equilibrio sobre los arcos de la red multimodal.

T : vector de viajes entre pares origen-destino de la red multimodal (considera las variables pertinentes al problema combinado de Partición Modal - Asignación).

T^* : vector de viajes de equilibrio entre pares origen-destino de la red multimodal (ídem T).

$c(X)$: vector columna de funciones de coste en los arcos de la red (con Jacobiano no diagonal y asimétrico).

$g(T)$: vector de funciones inversas de demanda o transformadas de demanda (con Jacobiano diagonal) para las variables pertinentes al problema de equilibrio tratado (Partición Modal - Asignación) que viene de las ecuaciones (7.6-7.8).

Para el problema de equilibrio simultáneo planteado, las funciones de coste en los arcos de transporte público son asimétricas (el Jacobiano del vector de funciones de coste es asimétrico). Por lo tanto, no hay un problema de optimización equivalente a (7.6), basado en integrales del tipo de las definidas por Beckman. En este caso se debe diagonalizar las funciones de coste. Esta diagonalización de las funciones $c_s^{kp\bar{m}}$ da lugar a funciones $\hat{c}_s^{kp\bar{m}}$ dependientes de su propio flujo ($\hat{c}_s^{kp\bar{m}} = \hat{c}_s^{kp\bar{m}}(V_s^{kp\bar{m}})$).

Problema diagonalizado de partición modal – asignación para múltiples clases de usuarios y propósitos de viaje.

A continuación se presenta el problema genérico de optimización equivalente para el problema diagonalizado de Partición Modal y Asignación conjuntas:

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_k \sum_p \sum_{\tilde{m}} \sum_a \int_0^{f_a^{kp\tilde{m}}} c_a^{kp\tilde{m}}(x) dx + \sum_k \sum_p \sum_{\tilde{m}} \sum_s \int_0^{V_s^{kp\tilde{m}}} \hat{c}_s^{kp\tilde{m}}(x) dx \\ & + \sum_k \sum_p \sum_n \frac{1}{\lambda^{kp}} \sum_w T_w^{kpn} (\ln T_w^{kpn} - 1) - \sum_k \sum_p \sum_n \frac{1}{\gamma^{kpn}} \sum_w T_w^{kpn} (\ln T_w^{kpn} - 1) \\ & + \sum_k \sum_p \sum_n \frac{1}{\gamma^{kpn}} \sum_{m \in n} \sum_w T_w^{kpm} (\ln T_w^{kpm} - 1) \end{aligned} \quad (7.10)$$

s.a.:

$$T_w^{kp} = \sum_n T_w^{kpn}, \quad \forall w, k, p \quad (u_w^{kp}) \quad (7.11)$$

$$T_w^{kpn} = \sum_{m \in n} T_w^{kpm}, \quad \forall w, k, p, n \quad (u_w^{kpn}) \quad (7.12)$$

$$T_w^{kpm} = \sum_{r \in P_w^m} h_r^{kpm}, \quad \forall w, k, p, m \quad (u_w^{kpm}) \quad (7.13)$$

$$f_a^{kp\tilde{m}} = \sum_{r,w} \delta_{ar} h_r^{kpm}, \quad \forall a, k, p, m \quad (7.14)$$

$$V_s^{kp\tilde{m}} = \sum_{r,w} \delta_{sr} h_r^{kpm}, \quad \forall s, k, p, m \quad (7.15)$$

donde:

\tilde{m} : modo de transporte privado.

a : arco de la red.

\bar{m} : modo de transporte público.

s : sección de ruta

$f_a^{\tilde{m}}$: flujo en el arco a en el modo \tilde{m} para el propósito p y clase de usuario k

$V_s^{\bar{m}}$: flujo de pasajeros en la sección de ruta s en el modo \bar{m} para el propósito p y clase de usuario k

$c_s^{\tilde{m}}$: función de coste de viaje en el arco a en el modo \tilde{m} para el propósito p y clase de usuario k

$c_s^{\bar{m}}$: función de coste en transporte público en la sección de ruta s en el modo \bar{m} para el propósito p y clase de usuario k

n : nido del modelo jerárquico.

m : modo de transporte dentro del nido n .

$T_w^{k,p}$: número total de viajes en el par O-D w para el propósito p y clase de usuario k

$T_w^{k,p,n}$: número total de viajes en el par O-D w en el nido n para el propósito p y clase de usuario k

$T_w^{k,p,m}$: número total de viajes en el par O-D w en el modo m para el propósito p y clase de usuario k

$h_r^{k,p,m}$: flujo de la ruta r para el propósito p y clase de usuario k en el modo m .

$h_r^{k,p,\bar{m}}$: flujo de la ruta r para el propósito p y clase de usuario k en el modo \bar{m} .

$h_r^{k,p,\tilde{m}}$: flujo de la ruta r para el propósito p y clase de usuario k en el modo \tilde{m} .

λ, γ : parámetros de calibración de los nodos del árbol de decisión (logit).

δ_{ap} : variable binaria que toma valor 1 si el arco a pertenece a la ruta r y 0 en caso contrario.

δ_{sp} : variable binaria que toma valor 1 si la sección de ruta s pertenece a la ruta r y 0 en caso contrario.

Lógicamente, al conjunto de restricciones aquí expuestas deben añadirse las correspondientes a la no negatividad de flujos.

Las condiciones de optimalidad del problema diagonalizado de partición modal-asignación se exponen en el Anexo I de esta tesis.

Los dos primeros términos de (7.10) representan las transformadas de Beckman para el equilibrio de usuarios de las asignaciones de viajes en cada modo de transporte privado y público. Por su parte, los términos restantes corresponden a los niveles de la estructura jerárquica del modelo de reparto modal. Si dicha estructura fuera no jerárquica, los términos tercero y cuarto desaparecerían de la expresión (7.10).

Problema simplificado diagonalizado de partición modal – asignación con una clase de usuario y agregación del propósito de viaje.

Para el caso en el que se considere una sola clase de usuarios y se agreguen todos los propósitos de viaje, la expresión (7.10) se simplifica a:

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{\tilde{m}} \sum_a \int_0^{\tilde{f}_a^{\tilde{m}}} c_a^{\tilde{m}}(x) dx + \sum_m \sum_s \int_0^{\tilde{V}_s^{\tilde{m}}} c_s^{\tilde{m}}(x) dx + \\ & + \sum_n \frac{1}{\lambda} \sum_w T_w^n (\ln T_w^n - 1) - \sum_n \frac{1}{\gamma^n} \sum_w T_w^n (\ln T_w^n - 1) + \sum_n \frac{1}{\gamma^n} \sum_{m \in n} \sum_w T_w^m (\ln T_w^m - 1) \end{aligned} \quad (7.16)$$

s.a.:

$$T_w = \sum_n T_w^n, \forall w \in W$$

$$T_w^n = \sum_{m \in n} T_w^m, \forall w, n$$

$$T_w^m = \sum_{r \in P_w^m} h_p^m, \forall w, m \quad (7.17)$$

$$\tilde{f}_a^{\tilde{m}} = \sum_{p,w} h_p^{\tilde{m}} \cdot \beta_{ap}, \forall a, \tilde{m}$$

$$\tilde{V}_s^{\tilde{m}} = \sum_{p,w} h_p^{\tilde{m}} \cdot \beta_{sp}, \forall s, \tilde{m}$$

$$h_p^m, h_p^{\tilde{m}}, h_p^{\bar{m}}, V_s^{\tilde{m}}, f_a^{\tilde{m}} \geq 0, \forall p, s, a, m, \tilde{m}, \bar{m}$$



7.3. ASIGNACIÓN DE EQUILIBRIO

7.3.1. INTRODUCCIÓN.

En este apartado se describen con más detalle los modelos de asignación a las redes de transporte público y privado.

Los flujos de vehículos de transporte privado y los flujos de pasajeros de transporte público provienen de la solución de un problema de asignación de equilibrio sobre las redes correspondientes, donde las matrices de viajes se consideran fijas.

Las interacciones de congestión se consideran explícitamente dado que las funciones de coste para transporte privado en aquellos arcos por los cuales circulan vehículos de transporte público, dependen del flujo total de vehículos sobre el arco. Por su parte, para aquellos arcos donde los servicios de transporte público comparten capacidad vial con el transporte privado, el tiempo de viaje para los buses depende del flujo total de vehículos que circula por el arco.

7.3.2. MODELOS DE ASIGNACIÓN EN REDES DE TRANSPORTE PÚBLICO. ESTADO DEL ARTE.

A continuación se presentan algunos modelos de asignación de transporte público para posteriormente exponer el modelo aplicado.

Los primeros trabajos que aparecieron sobre el tema suponían que los pasajeros simplemente elegían las líneas cuyo tiempo de viaje total fuera más corto (lo que en la literatura se conoce como elección de itinerario mínimo), como son los trabajos de Dial (1967), Fearnside y Draper (1971), y Le Clercq (1972). Este enfoque no sólo despreciaba el efecto de la congestión, sino que además asumía que los pasajeros que elegían una línea la esperaban hasta que pasara, lo que es válido sólo cuando no existen líneas paralelas que sirvan un mismo par origen-destino. Chriqui y Robillard (1975) presentaron un modelo que soluciona este último problema, donde los usuarios escogen un subconjunto de líneas que minimiza su tiempo esperado considerando el viaje más la espera. A pesar de que este modelo no considera congestión, el supuesto del conjunto de



líneas atractivas es ampliamente aceptado para la modelización de este tipo de asignaciones.

Entre los primeros modelos que abordaron el efecto de la congestión en la asignación de transporte público está el trabajo de Spiess (1984), en el que la congestión se modeliza como una incomodidad que sufre al viajar el pasajero. La principal limitación de este enfoque es que no se incorpora el efecto de la congestión en el tiempo de viaje. El trabajo de Gendreau (1984) incorporó el efecto de la congestión en el tiempo de espera modelando las colas para abordar a los buses, pero con un nivel de complejidad que no permitía encontrar equilibrios. El primer trabajo donde se incorpora la congestión de manera exitosa es De Cea y Fernández (1993), donde se asume que el efecto de la congestión en el transporte público se traduce en mayores tiempos de espera en las paradas, y se modela definiendo una “frecuencia efectiva” que decrece al aumentar el nivel de flujo en la red. Una de las desventajas de este enfoque es que asume que todos los pasajeros consideran los mismos conjuntos de líneas atractivas, lo que en ciertos casos no permite la existencia de un equilibrio de Wardrop. El trabajo de Cominetti y Correa (2001) presenta un modelo donde los pasajeros pueden escoger diferentes conjuntos de líneas atractivas, superando la limitación recién mencionada, pero siempre considerando que la congestión se traduce en tiempos de espera en las paradas como consecuencia de la restricción de capacidad de los buses, sin relacionar directamente el número de pasajeros que viajan en el vehículo (y que lo abordan o descienden de él en el trayecto) con el tiempo que demora el bus en llegar a su destino. Finalmente, Larraín y Muñoz (2008) incluyen los efectos de los tiempos de subida/bajada de los pasajeros en los tiempos de viaje de cada sección de línea.

7.3.3. MODELO DE ASIGNACIÓN DE TRANSPORTE PÚBLICO CONSIDERANDO RESTRICCIÓN DE CAPACIDAD EN LOS BUSES (DE CEA Y FERNÁNDEZ (1993)).

Supuestos básicos

El modelo asume que los usuarios eligen, de entre todas las rutas posibles que unen un determinado par de nodos sobre la red de transporte público, aquella ruta que minimiza su tiempo (coste) total de viaje (tarifa + tiempo de viaje en vehículo + tiempo de espera + tiempo de acceso).



En relación con el conjunto de líneas disponibles para realizar un viaje, el modelo asume que entre cada par de nodos de la red de transporte público existe un conjunto de “líneas comunes” o igualmente atractivas para los usuarios. De esta forma, en cada parada, los pasajeros considerarán el conjunto de líneas comunes para realizar sus viajes y abordarán el primer vehículo que pertenezca a este conjunto y que tenga capacidad disponible. De esta forma, se considera la congestión en el transporte público en cuanto a que la restricción de capacidad en los buses puede producir que los tiempos de espera aumenten al no poder abordar el primer vehículo que pase por la parada al poder estar éste a capacidad.

Concepto de Frecuencia efectiva.

Cuando no existe congestión en la red de transporte público, el tiempo de espera de los pasajeros que abordan la sección de ruta s puede expresarse de la siguiente forma, suponiendo que χ es igual a 1 (tiempo esperado de espera igual al intervalo):

$$TE_s = \frac{\chi}{\sum_l x_l^s \cdot f_l} = \frac{1}{f_s} \tag{7.18}$$

donde la frecuencia total de la sección de ruta s es f_s . Las variables f_l son llamadas “frecuencias nominales” de cada línea l y constituyen valores constantes para cada línea.

Los flujos de pasajeros en cada sección son asignados a las líneas que la componen, proporcionalmente a su frecuencia nominal relativa.

Sin embargo, cuando existe congestión, una proporción de los buses que llegan al nodo de origen de la sección de ruta s , $i(s)$, lo hará lleno. Para representar este fenómeno, se introduce el concepto de “frecuencia efectiva”. Cuando no hay congestión, la frecuencia efectiva de una línea es igual a su frecuencia nominal, pero a medida que la congestión aumenta los tiempos de espera de los pasajeros en las paradas aumentará y las frecuencias efectivas se reducirán: será más difícil para un usuario tomar un bus de una línea congestionada. Por lo tanto, la frecuencia efectiva, f_i^s , es una propiedad de la línea en la parada $i(s)$ y siempre se cumplirá que $f_i^s \leq f_l$.

La tasa de ocupación de los vehículos de la línea l que llegan a la parada $i(s)$ depende de la capacidad de la línea, k_l , y del número de pasajeros que toman la línea antes y se bajan después de dicha parada, \tilde{v}_{il} .

Para cada línea que llega al nodo $i(s)$ se define un “índice equivalente de tiempo de espera promedio” según la siguiente expresión:

$$TE_l^i \stackrel{def}{=} \frac{\chi_l}{f_l} + \varphi_l \left(\frac{\tilde{v}_{il}}{k_l} \right) \quad (7.19)$$

donde φ_l es una función monótonamente creciente en \tilde{v}_{il} .

El valor de la expresión TE_l^i será el mismo para todos los pasajeros que esperan en el nodo $i(s)$, independiente de la sección de ruta que utilicen. Cabe señalar que TE_l^i es una definición y no representa lo que realmente esperan los pasajeros en la parada, ya que ellos siempre esperan un conjunto de líneas atractivas o comunes para realizar su viaje.

La “frecuencia efectiva” de una línea l en la parada $i(s)$ se define, entonces, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$f_l^{i^s} = \left(\frac{\chi_l}{TE_l^i} \right) \quad (7.20)$$

Por lo tanto, si no existe congestión, $\varphi_l = 0$ en (7.19), el valor de la frecuencia efectiva dependerá de la parada siendo igual a la frecuencia nominal. Por otra parte, a medida que aumenta la congestión, el valor del φ_l crecerá y, por lo tanto, la frecuencia efectiva disminuirá, $f_l^{i^s} \leq f_l$. Si $i(s)$ es la primera parada de la línea, φ_l será igual a cero aun cuando exista congestión, dado que \tilde{v}_{il} será nulo.

Dada la forma en que ha sido definida, la frecuencia efectiva puede tender a cero, pero nunca será igual a cero. Por lo tanto, y como consecuencia del hecho que no se considera una capacidad estricta del servicio, una línea nunca estará totalmente llena.

La frecuencia efectiva f_s^l para la sección de ruta s se define como la suma de las frecuencias efectivas de las líneas que pertenecen al conjunto de líneas comunes \bar{A}_s :



$$f_s^l = \sum_{l \in \bar{A}_s} f^l, \quad \forall s \in S \quad (7.21)$$

Por su parte, el número de pasajeros que usan cada línea de la sección de ruta será proporcional a su frecuencia efectiva relativa, tal como se muestra en la siguiente expresión:

$$v_l^s = \begin{cases} \frac{f^l}{f_s^l} \cdot V_s, & \text{si } l \in \bar{A}_s \\ 0, & \text{si } l \notin \bar{A}_s \end{cases} \quad \forall l \in A_s \quad (7.22)$$

Cabe recordar que el cálculo de \bar{A}_s dependerá del nivel de congestión que exista en el sistema de transporte público.

Usando las variables binarias x_l^s la expresión anterior se puede escribir como sigue:

$$v_l^s = x_l^s(v) \cdot f^l(v) \cdot TE^s(v) \cdot V_s \quad (7.23)$$

donde v es el vector de flujos en las secciones de línea y TE^s es el tiempo de espera promedio para un usuario que usa la sección de ruta s , el cual es definido como el inverso de la frecuencia efectiva de la sección de ruta, f_s^l . Esto significa que los pasajeros que viajan a través de la sección de ruta s se asignarán a las líneas que la componen proporcionalmente a los lugares disponibles de los buses en la parada $i(s)$.

Es importante señalar que esta aproximación no garantiza que no haya sobrecarga en las líneas. Sin embargo, las sobrecargas serán significativamente más bajas que en el caso en que no se considera restricción de capacidad de los vehículos de transporte público y sólo aparecerán cuando las demandas de pasajeros sean muy altas y la capacidad del sistema para un par origen-destino dado no sea suficiente para acoger esa demanda de viajes.

Formulación del problema de equilibrio

En el equilibrio se cumplen las siguientes condiciones sobre la red de transporte público, de acuerdo al primer principio de Wardrop:



$$C_r \begin{cases} = u_w, & \forall r \in R_w / h_r \geq 0; \\ > u_w, & \forall r \in R_w / h_r = 0, \end{cases} \quad \forall w \in W \quad (7.24)$$

donde u_w corresponde al coste de viaje en el equilibrio sobre todas las rutas utilizadas que conectan el par w . Por lo tanto, la formulación del problema de equilibrio puede representarse por el siguiente problema variacional:

$$c(V^*) \cdot (V^* - V) \leq 0, \quad \forall V \in \Omega \quad (7.25)$$

donde c es el vector de costes en secciones de ruta, V es cualquier vector factible de flujos en secciones de ruta $\{V_s\}$ y V^* representa la solución de equilibrio en términos de flujos en secciones de ruta.

Algoritmos de solución

Tal y como se ha expuesto en el apartado anterior, las funciones de coste de transporte público deben ser diagonalizadas para poder obtener un problema de optimización equivalente. Un método de solución comúnmente utilizado en estos casos es el algoritmo de diagonalización (Florian, 1977; Abdulaal y LeBlanc, 1979), que permite obtener en cada iteración funciones de coste separables y, por lo tanto, el planteamiento de un problema de optimización equivalente. En el Anexo II se exponen los conceptos básicos de este algoritmo, así como un ejemplo de aplicación.

7.3.4. MODELO DE ASIGNACIÓN DE EQUILIBRIO EN REDES DE TRANSPORTE PRIVADO

El modelo de asignación de equilibrio en redes de transporte privado utilizado en la formulación del problema de optimización de frecuencias corresponde a un problema de equilibrio de tráfico sobre una red (vial) en que interactúan múltiples categorías de usuarios.

Supuestos básicos

La solución de equilibrio del problema de asignación se obtiene cuando “para cada categoría y para cada par origen-destino de viaje, ningún viajero tiene incentivo para cambiar unilateralmente de ruta sobre la red vial”. Luego, de acuerdo con el primer principio de Wardrop, para cada par O-D y cada clase de usuario, las rutas utilizadas

presentan igual coste de operación, en tanto las no utilizadas presentan costes de operación superiores.

La expresión siguiente resume el principio de equilibrio planteado:

$$C_p^{k^*} - u_w^{k^*} \begin{cases} = 0, & \text{si } h_p^{k^*} > 0 \\ \geq 0, & \text{si } h_p^{k^*} = 0 \end{cases} \quad \forall p \in P_w, w \in W, k \in K \quad (7.26)$$

donde $u_w^{k^*}$ es el coste de operación de equilibrio correspondiente al par O-D w , para un usuario de categoría k ; $C_p^{k^*}$ es el coste de equilibrio de la ruta p para usuarios de categoría k ; $h_p^{k^*}$ es el flujo de equilibrio correspondiente a usuarios de categoría k , sobre la ruta p que pertenece al conjunto de rutas entre el par w , P_w ; W es el conjunto de todos los pares origen-destino y K el conjunto de todas las categorías de usuarios.

Formulación del modelo matemático

El modelo de asignación de transporte privado (problema de equilibrio de tráfico multiclase) puede ser formulado a través de la siguiente desigualdad variacional:

$$C(F^*)^T \cdot (F - F^*) \geq 0, \quad \forall F \in \Omega \quad (7.27)$$

donde $C^T (= \{c_a^k\})$ es el vector traspuesto de funciones de costes en arcos, para cada categoría de usuarios; $F^* (= \{f_a^{k^*}\})$ es el vector de flujos de equilibrio en arcos, para cada categoría de usuarios; y $F (= \{f_a^k\})$ es un vector de flujos en arcos factible.

Las restricciones del problema son las que se presentan a continuación:

$$T_w^k = \sum_{p \in P_w} h_p^k, \quad \forall w \in W, \forall k \in K \quad (7.28)$$

$$f_a^k = \sum_{p \in P} h_p^k \cdot \delta_{ap}, \quad \forall a \in A, \forall k \in K \quad (7.29)$$

$$f_a = \sum_{k \in K} f_a^k, \quad \forall a \in A \quad (7.30)$$



$$\delta_{ap} = \begin{cases} 1, & \text{si } a \in p \\ 0, & \text{si } a \notin p \end{cases} \quad \forall a \in A, \forall p \in P \quad (7.31)$$

$$h_p^k \geq 0, \quad \forall p \in P, \forall k \in K \quad (7.32)$$

Como consecuencia de lo anterior, el Jacobiano de las funciones de coste es simétrico y, entonces, la desigualdad variacional (7.27) puede plantearse como el siguiente problema de optimización equivalente:

$$\underset{\{F\}}{\text{Min}} Z = \sum_{a \in A} \int_0^{f_a} s_a(y_a) dy_a \quad (7.33)$$

s.a.

$$F \in \Omega$$

donde Ω es el conjunto definido por las restricciones (7.28) a (7.32).

Algoritmo de solución

Para resolver el problema de equilibrio de tráfico del modelo de asignación de transporte privado se utiliza el algoritmo de Frank-Wolfe (Frank y Wolfe, 1956). En síntesis, este método corresponde a una variación del conocido método del gradiente, y como tal, consta de dos etapas. La primera de ellas consiste en determinar una dirección de descenso de la función objetivo (fase de búsqueda de dirección), mientras que la segunda consiste en determinar cuál es el avance en la dirección encontrada en la primera etapa (minimización unidimensional).

El método de Frank-Wolfe se aplica partiendo de una solución inicial factible, en forma iterativa, hasta cumplir los criterios de convergencia adoptados. En el Anexo II se exponen los conceptos básicos de este algoritmo, así como un ejemplo de aplicación.

Capítulo 8

ALGORITMOS DE RESOLUCIÓN MÁS IMPORTANTES



CAPÍTULO 8. ALGORITMOS DE RESOLUCIÓN MÁS IMPORTANTES.

8.1. DESCRIPCIÓN DEL ALGORITMO DE RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN DEL NIVEL INFERIOR.

Para facilitar el seguimiento del algoritmo, se expondrá la notación utilizada:

- El superíndice f (punto) se utiliza para identificar los resultados obtenidos de la etapa de “búsqueda de solución inicial factible”.
- El índice \bar{f} (guión) identifica los resultados obtenidos de la etapa “solución auxiliar a rutas mínimas”.
- Finalmente f^n denota una solución correspondiente a la iteración n del algoritmo Frank-Wolfe.

Etapa 1: Datos Iniciales.

1.1. Se calculan los tiempos a flujo libre (niveles de servicio iniciales) para cada par O-D w y en todos los modos de transporte m : C_w^m .

Etapa 2: Búsqueda de Solución inicial factible.

2.1. En base a los niveles de servicio anteriores, se calculan las utilidades para cada par w , modo m , propósito q y categoría v : $u_w^{mqv} = g^{mqv}(C_w^m)$, $\forall(m, q, v)$.

2.2. Con las utilidades calculadas y la matriz de viajes global (dato) se calculan las matrices de viajes para cada modo, propósito y clase de usuario $\{T_w^{mqv}\}$.

2.3. Seguidamente, se deberán agregar las matrices anteriores en matrices de transporte

$$\text{privado } (0) \text{ y público } (m): T_w^{0k} = \sum_q \sum_{v \rightarrow k} T_w^{mqv}; \quad T_w^m = \sum_q \sum_v T_w^{mqv}.$$

2.4. Se realiza una asignación de equilibrio de usuarios para transporte privado, según categoría k. Para ello se consideran como datos $\{T_w^{0k}\}$ y la red vial, obteniéndose

$$\text{los flujos de equilibrio: } \left\{ \dot{f}_a^0 = \sum_k \dot{f}_a^{0k} \right\}.$$

2.5. Con $s_a \left(\dot{f}_a^0 + FF_a \right)$ (tiempo de viaje en la red vial), se determinan los tiempos de

viaje en los arcos para los modos de transporte que compartan infraestructura con el automóvil: $\{c_a^m = \psi^m(s_a)\}$ y seguidamente se calcula el tiempo más tarifa asociado

a cada sección de ruta s para cada modo de transporte \bar{t}_s .

2.6. Se realiza una asignación a rutas mínimas de los modos de transporte público tomándose como datos la matriz de viajes $\{T_w^m\}$ y las respectivas redes,

obteniéndose los pasajeros sobre las redes de transporte público $\{\dot{V}_s^m\}$.

Por lo tanto, como resultado de esta etapa se obtiene: $\left[\left(T_w^{0k}, T_w^m \right), \left(\dot{f}_a^{0k}, \dot{V}_s^m \right) \right]$

Etapa 3: Iteraciones de Diagonalización (I).

3.1. Considerar: $\left(\dot{f}_a^{0k}, \dot{V}_s^m \right)$ de 2.9 si $I = 1$
 $\left(T_w^{0k}, T_w^m \right)$ de 3.4 si $I > 1$

3.2. Diagonalización de las funciones de coste en las secciones de ruta de transporte público: se fijan los flujos compitentes de distintos tipos de pasajeros $\bar{V}_s^{m(I)}$ y se

calcula la función de costes diagonalizada para cada sección. Su valor permanece constante durante toda la iteración de diagonalización $c_s^m = c_s^m \left(V_s^m + \bar{V}_s^m \right) = c_s^m \left(V_s^m \right)$

3.3. Iteraciones de Frank-Wolfe para el problema diagonalizado (n):

Fase I: aproximación lineal: genera una solución auxiliar a rutas mínimas de matrices de viajes por modo y los flujos correspondientes siguiendo el siguiente procedimiento:

- Cálculo de rutas mínimas según categoría de usuarios para el transporte privado $\{C_w^{0k}\}^{I,n}$ y público $\{C_w^m\}^{I,n}$.
- Cálculo de nuevas matrices de viajes para cada modo: $\left(\bar{T}_w^{0k}, \bar{T}_w^m \right)$.
- Asignar las matrices a las redes multimodales obteniendo las soluciones auxiliares de flujos en arcos y secciones de ruta: $\left(\bar{f}_a^{0k}, \bar{V}_s^m \right)$

Como resultado de la Fase 1 de Frank-Wolfe se obtiene: $\left(\bar{T}_w^{0k}, \bar{T}_w^m, \bar{f}_a^{0k}, \bar{V}_s^m \right)^{(I,n)}$

Fase II: etapa de minimización unidimensional: se obtiene el valor de λ resolviendo $dZ(\lambda)/d\lambda = 0$ (ver apartado 9.2.3 de Frank-Wolfe).

Fase III: Test de convergencia: si $\lambda < 0.05$ se pasar a 3.4, sino se avanza en la dirección encontrada y se genera una nueva solución factible de flujos en arcos y matrices para la iteración $n+1$, actualizando los tiempos de viaje en arcos de transporte público y volviendo a la Fase 1:

$$\begin{aligned} f_a^{0k(I,n+1)} &= \lambda \bar{f}_a^{0k} + (1-\lambda) f_a^{0k(I,n)} \\ V_s^{m(I,n+1)} &= \lambda \bar{V}_s^m + (1-\lambda) V_s^m(I,n) \\ T_w^{0k(I,n+1)} &= \lambda \bar{T}_w^{0k(I,n)} + (1-\lambda) T_w^{0k(I,n)} \\ T_w^{mqv(I,n+1)} &= \lambda \bar{T}_w^{mqv(I,n)} + (1-\lambda) T_w^{mqv(I,n)} \\ s_a \left(f_a^0 + FF_a \right) &^{(I,n+1)} \end{aligned}$$

3.4. Test de convergencia del algoritmo de diagonalización: se comparan dos iteraciones sucesivas:



$$\begin{aligned} (f_a^0)^{(I-1)} &\approx (f_a^0)^{(I)} \\ (V_s^m)^{(I-1)} &\approx (V_s^m)^{(I)} \\ (T_w^{0q})^{(I-1)} &\approx (T_w^{0q})^{(I)} \\ (T_w^{mq})^{(I-1)} &\approx (T_w^{mq})^{(I)} \end{aligned}$$

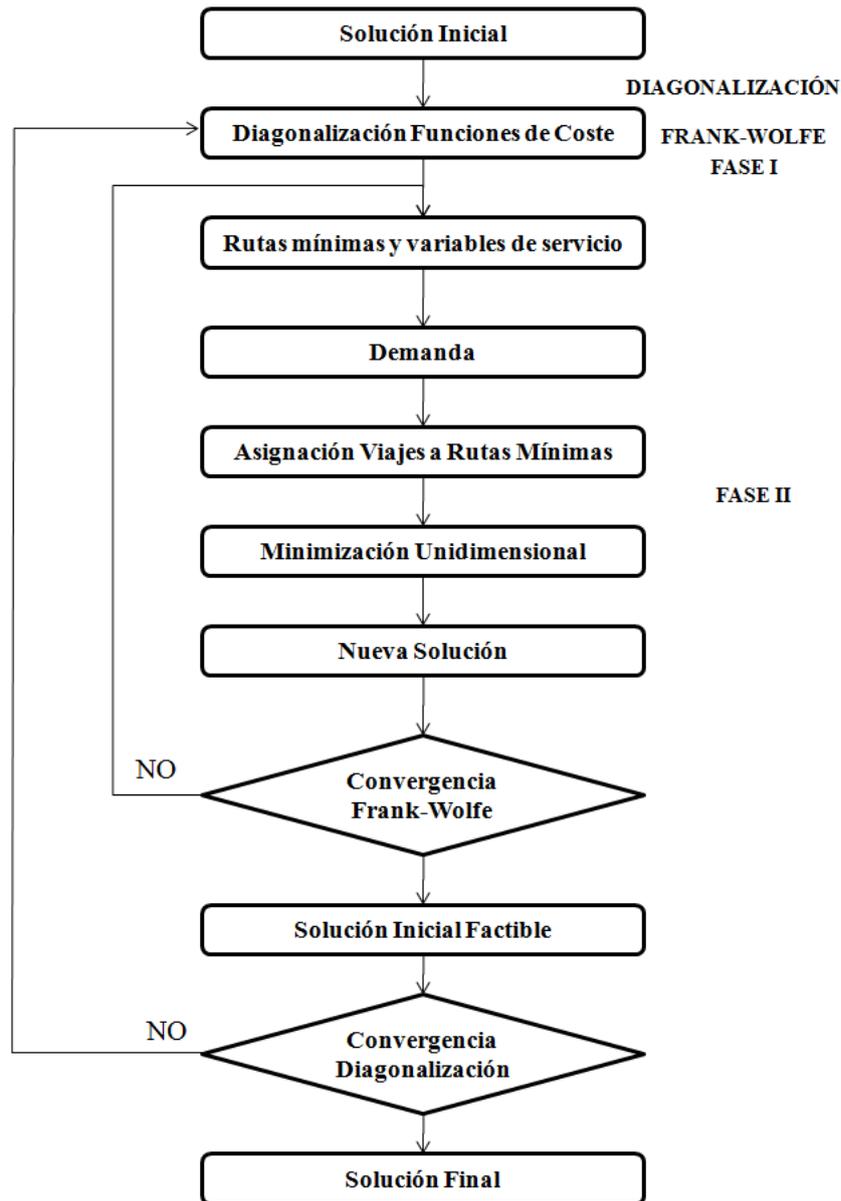


Fig. 8.1.- Diagrama de flujo del algoritmo de solución del problema combinado partición modal- asignación.

Si no son suficientemente cercanas, entonces se obtiene una nueva solución para la iteración (I+1) de diagonalización:

$$\begin{aligned} (f_a^0)^{(I+1)} &\approx \frac{f_a^{0k(I,n+1)} + f_a^{0k(I-1)}}{2} \\ (V_s^m)^{(I+1)} &\approx \frac{V_s^{m(I,n+1)} + V_s^{m(I-1)}}{2} \\ (T_w^{0k})^{(I+1)} &\approx \frac{T_w^{0k(I,n+1)} + T_w^{0k(I-1)}}{2} \\ (T_w^{mqv})^{(I+1)} &\approx \frac{T_w^{mqv(I,n+1)} + T_w^{mqv(I-1)}}{2} \end{aligned}$$

Se actualizan tiempos de viaje en arcos y en arcos de transporte público:

$$s_a (f_a^0 + FF_a)^{(I+1)}$$

Por el contrario, si dos soluciones son suficientemente cercanas \rightarrow parar.

8.2. ALGORITMO DE RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN BINIVEL.

8.2.1. ESTRUCTURA DEL ALGORITMO PROPUESTO.

Antes de aplicar el algoritmo de resolución la red debe discretizarse en arcos más pequeños de distancia igual d , de tal manera que cada nuevo nodo representa una posible ubicación de la parada. Por otra parte, el área de estudio se dividirá en zonas homogéneas atendiendo a características que el modelizador debe decidir: densidad de población, actividad comercial, usos del suelo, etc.

Posteriormente, se vuelca en el modelo de red, vías GIS, un vector de atributos en cada nodo de la red donde se incluyen los siguientes campos: etiqueta de identificación, coordenadas XYZ, pendiente longitudinal, si es semáforo o no, si es intersección o no, si es un punto obligado de parada o no, si está en túnel o no, etc.

Una vez que la red esté discretizada, con los datos volcados de cada nodo y se tenga la zonificación agregada del área de estudio, se aplica el algoritmo, de tipo heurístico, mostrado en la figura 8.2 y que se describe a continuación:



Etapa 1: Inicialización.

En esta etapa se debe inicializar un vector, cuyo orden será igual al número de zonas creadas, otorgando a cada zona o elemento (i) del mismo un valor de igual distanciamiento entre paradas $[d_i^0]$. Una vez hecho esto, se realiza un barrido de toda la red de transporte público, a partir de las cabeceras de las líneas, ubicando las paradas a la distancia d establecida en función de la zona.

La aplicación diseñada trata conjuntamente los tramos donde discurren dos o más líneas de bus simultáneamente con el objetivo lógico de que éstas paren en el mismo punto.

Etapa 2: Problema de optimización del Nivel Inferior:

Con la configuración de las paradas dada por el vector $[d_i^n]$ y tomando la matriz O/D, dato, se resuelve el problema de optimización del nivel inferior, aplicando el modelo de partición modal-asignación mediante los algoritmos descritos en el apartado 8.1. De la asignación resultante en cada modo de transporte, se extraen el número de viajeros y los tiempos de viaje, acceso, transbordo y espera del transporte público, viaje del transporte privado y datos de operación del transporte público.

Etapa 3: Cálculo de la función de Costes del Nivel Superior:

Tomando como inputs los datos de salida de la Etapa 2, se calcula el Coste Social total de la función objetivo del nivel superior, comprobando el cumplimiento de las restricciones operacionales.

Etapa 4: Generación de un nuevo vector $[d_i^{n+1}]$:

Se genera un nuevo vector mediante un algoritmo de búsqueda (Hooke-Jeeves o Tabu), haciendo $n = n + 1$. Si la iteración $n-1=0$, o no se ha alcanzado el fin de la iteración completa del algoritmo, se vuelve a la Etapa 2, si no, se avanza a la Etapa 5.

Etapa 5: Criterio de parada:

Se comparan los valores de la función de costes en las etapas n y $n-1$. Si están suficientemente cerca y se cumple con el criterio de salida del algoritmo de la Etapa4, se para y se obtiene la solución final. En caso contrario, volver a la Etapa 2.

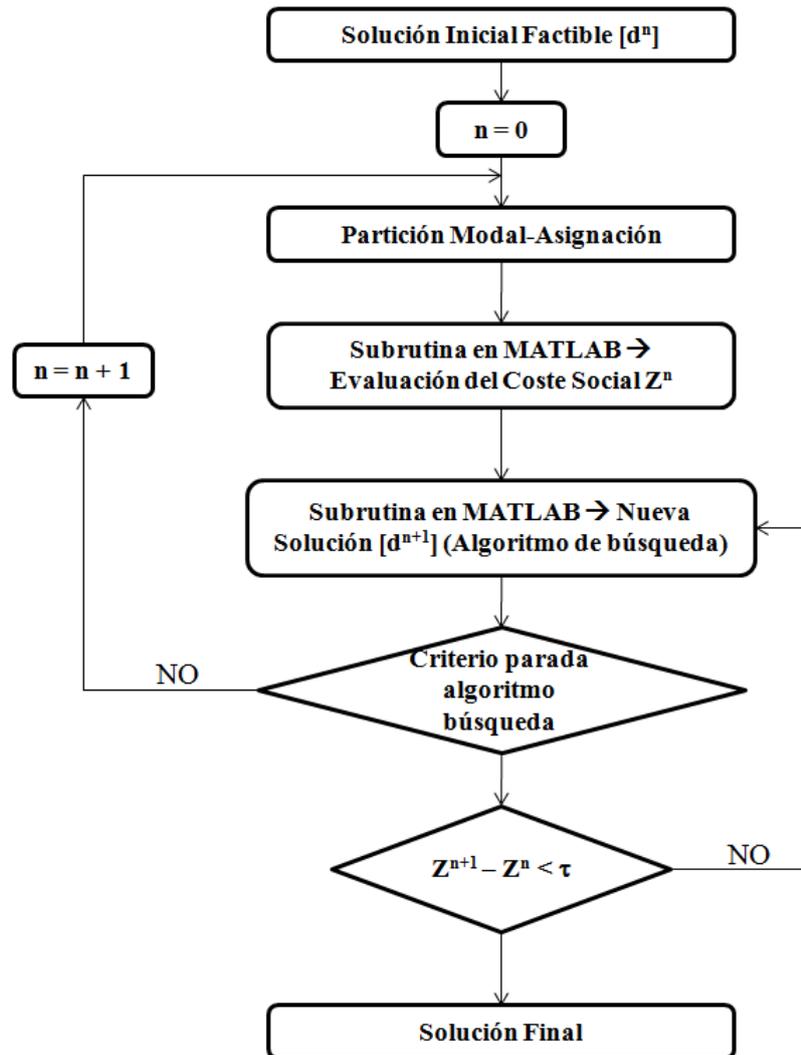


Fig. 8.2.- Diagrama de flujo del algoritmo de resolución.

8.2.2. ALGORITMO DE HOOKE-JEEVES.

Como se mencionó anteriormente, el algoritmo de Hooke-Jeeves (Hooke y Jeeves, 1961) no exige ningún atributo especial de la función objetivo. El algoritmo no requiere convexidad de dicha función ni una expresión analítica explícita de sus derivadas con respecto a las variables de decisión del problema. Sí requiere que la función sea continua y evaluable para cualquier valor factible de las variables. Puede trabajar con cualquier función continua por extraña que sea su forma, dada la manera en que opera el algoritmo.

Si bien estas características constituyen una ventaja desde el punto de vista de la aplicabilidad del algoritmo, pueden representar una desventaja en cuanto a su eficiencia,



al no hacer uso de las características de regularidad que la función objetivo pueda presentar, como por ejemplo, la convexidad de la función en cada una de las variables de decisión.

Por otro lado, este algoritmo no asegura la obtención de un óptimo global, a menos que el problema a resolver sea estrictamente convexo. En el caso del problema de diseño de redes de transporte público, dadas las características de la función objetivo, el algoritmo de Hooke-Jeeves sólo garantiza la obtención de un óptimo local y, por lo tanto, con el objeto de intentar la obtención del óptimo global, debe ser aplicado partiendo de distintas soluciones iniciales y con distintos valores de los parámetros involucrados.

El algoritmo de Hooke-Jeeves consiste, básicamente, en la repetición de dos etapas, a saber:

Búsqueda exploratoria a través de cada una de las coordenadas del espacio de soluciones, con el objeto de encontrar una buena dirección local de descenso (reducción del valor de la función objetivo).

Patrón de movimiento consistente en un avance según la dirección determinada en la primera etapa.

a) *Etapas de búsqueda exploratoria en las coordenadas*

En esta etapa, el algoritmo realiza la búsqueda de un punto que señale una buena dirección local de movimiento. Esto se efectúa aumentando el valor de una de las variables en una cantidad pre-establecida ("delta") y evaluando la función objetivo en este nuevo punto.

Si el valor de la función objetivo resulta ser menor que el obtenido en el punto de partida, se acepta el nuevo punto y se pasa a examinar la siguiente variable. Si, por el contrario, el valor de la función objetivo en el nuevo punto resulta ser mayor que en el punto de partida, se disminuye el valor original de la variable en "delta" y se evalúa nuevamente la función objetivo. Si el valor de ésta es menor que en el punto de partida, se acepta el nuevo punto y se examina la siguiente coordenada. En caso que el valor de la función objetivo sea mayor en el nuevo punto, se vuelve la variable a su valor original, sumándole "delta", y se pasa a examinar la siguiente coordenada.



Este proceso se repite con cada una de las variables de decisión del problema.

Una vez terminado el proceso, se verifica si el valor de la función objetivo en el punto obtenido como resultado de la búsqueda exploratoria es menor que en el mejor punto base encontrado hasta el momento. Si es menor, se establece el nuevo punto como punto base y se pasa a la segunda etapa del método. Si la búsqueda exploratoria no tuvo éxito, se reduce el valor del parámetro "delta" y se realiza una nueva etapa de búsqueda, esta vez a partir del mejor punto base que se tiene hasta el momento.

b) Etapa de avance en la dirección señalada por la búsqueda exploratoria (Patrón de movimiento)

Si la primera etapa del método ha dado buen resultado, es decir, se ha encontrado un punto para el cual el valor de la función objetivo es menor que en el mejor punto base, se efectúa un avance en la dirección señalada por éste y el nuevo punto encontrado. La longitud de este avance está determinada por la diferencia entre estos dos puntos multiplicada por un valor pre-establecido ("alpha").

Una vez realizado el avance en la dirección determinada en la primera fase, se vuelve a efectuar una búsqueda exploratoria a partir del nuevo punto encontrado, que corresponde a una nueva iteración del algoritmo de Hooke-Jeeves. Cabe señalar que se mantiene como punto base el encontrado en la fase exploratoria anterior y se utiliza como criterio de comparación para el resultado de la nueva búsqueda.

Criterios de parada del algoritmo

El valor del parámetro "delta" suele usarse como criterio de parada del algoritmo. Cada vez que se reduce el valor de dicho parámetro se compara con su tolerancia (valor mínimo que puede tomar) y si es menor, el algoritmo se detiene.

El valor del parámetro "alpha" suele ser mayor que el de "delta", debido a que en la fase exploratoria sólo se busca una buena dirección local de movimiento, en cambio, en la segunda etapa del algoritmo se debe avanzar en esa dirección.



Los parámetros "delta" y "alpha" son empíricos, de tal forma que sus valores deben ser determinados a base de pruebas, observando la velocidad de convergencia del algoritmo y las soluciones obtenidas para distintos valores de dichos parámetros.

Un segundo criterio de parada que puede utilizarse consiste en especificar el número máximo de iteraciones a realizar (una iteración completa comprende la fase de búsqueda exploratoria y el avance en la dirección determinada en ella).

Convergencia del algoritmo

Si la función objetivo del problema es estrictamente convexa, es claro que el método de Hooke-Jeeves es capaz de obtener el óptimo global. Sin embargo, si la función tiene óptimos locales, el algoritmo puede caer en uno de ellos y los valores de los parámetros pueden ser insuficientes para salir de él.

Para mejorar las posibilidades de obtener el óptimo global del problema puede repetirse su aplicación escogiendo aleatoriamente distintos puntos de partida y variando los valores de los parámetros.

A pesar que el algoritmo de Hooke-Jeeves es capaz de obtener "buenas" soluciones, tiene una baja velocidad de convergencia y, por consiguiente, un alto consumo de recursos computacionales, que se deben a las características de operación del método: el algoritmo realiza avances exploratorios, aumentando y disminuyendo el valor de cada una de las variables de decisión del problema. Cada uno de estos avances requiere de la evaluación de la función objetivo y, por lo tanto, la resolución de un problema de equilibrio sobre las redes de transporte, proceso que consume el mayor tiempo computacional.

Para evitar este problema, Abdulaal y Le Blanc (1979) propusieron una modificación del método de Hooke-Jeeves, consistente en suponer que pequeñas variaciones en los valores de las variables de decisión no producen variaciones significativas en los flujos de equilibrio. Esta suposición permite efectuar la etapa exploratoria con los flujos constantes y, por lo tanto, limitar el proceso de asignación a los puntos base determinados después de una iteración completa del algoritmo. Con esta simplificación es posible obtener resultados muy parecidos a los que entrega el algoritmo original, con

importantes ahorros computacionales, en especial, para la resolución de problemas con redes de transporte de tamaño real.

8.2.3. ALGORITMO DE BÚSQUEDA TABÚ.

La Búsqueda Tabú (*Tabu Search - TS*) es un procedimiento meta-heurístico que fue introducido por Glover (1989) y cuya característica distintiva es el uso de memoria adaptativa y de estrategias especiales de resolución de problemas. Se basa en la explotación de diversas estrategias de búsqueda inteligente para la resolución de problemas y en procedimientos de aprendizaje. Obtiene su nombre al hacer que ciertas soluciones no sean aceptadas por ser Tabú (prohibidas), evitando que soluciones que ya han sido visitadas sean seleccionadas nuevamente. La memoria guía la búsqueda y evita caer en la optimalidad local.

Estos métodos TS operan bajo el supuesto de que es posible construir una solución inicial y también un entorno para identificar *soluciones adyacentes* que puedan ser alcanzadas desde la solución actual.

Para explotar la memoria en la búsqueda Tabú y prevenir el ciclado de soluciones, se crea una lista donde se van a almacenar los movimientos clasificados como prohibidos (o Tabú), es decir, las soluciones que han sido analizadas en un pasado reciente y a las que no se podrá acceder durante un número determinado de iteraciones.

Es un método iterativo que comienza con una solución inicial X^0 elegida al azar de la cuál busca una solución X^n realizando diversos movimientos. Un movimiento consiste en realizar el mejor cambio posible de entre los elementos de la solución anterior, aunque este cambio lleve a una disminución de la calidad de la nueva solución. Este método utiliza los conceptos de vecinos y vecindario. Un vecino es un posible movimiento, el cual consiste en cambiar un atributo de la solución actual por otro, y el vecindario lo forman los vecinos que se pueden acceder desde una solución X en particular. En la iteración inicial o en cualquier otra iteración, a partir de una solución actual x cuyo vecindario es $N(x)$, el proceso pasa a la mejor solución de su vecindario $N^*(x)$. El movimiento siempre se acepta a pesar de que la nueva solución sea peor que la anterior.

$$N^*(x) = N(x) - T \quad (8.1.)$$

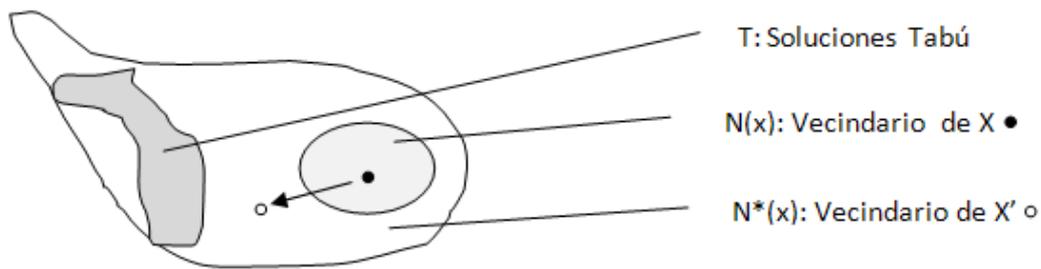


Fig. 8.3.- Representación de la búsqueda.

El Tabú Search (TS) es un método de Entorno Dinámico en el que se usan mecanismos de penalizaciones e incentivos para mejorar la búsqueda. Debe ser una lista dinámica porque tras un cierto número de iteraciones la búsqueda está en una región distinta y las soluciones antiguas pueden liberarse del status tabú.

Formalmente el método de búsqueda tabú es bastante directo de establecer, depende de cómo se define y utiliza la historia almacenada, y de cómo se determina el entorno candidato y la función de evaluación.

Para implementar restricciones tabú, debe tenerse en cuenta una excepción importante: estas restricciones no son inviolables bajo todas las circunstancias. Cuando un movimiento tabú resulta en una solución mejor que cualquier visitada hasta el momento, su clasificación puede ser reemplazada. Una condición que permite que ocurra tal reemplazo se llama *criterio de aspiración*. Los ***criterios de aspiración*** se introducen en la búsqueda tabú para determinar cuándo pueden ser reemplazadas las restricciones tabú y sirven para invalidar la clasificación tabú del movimiento en cuestión y seleccionarlo como mejor en esa iteración.

Las aspiraciones son de dos tipos: *aspiraciones de movimiento* y *aspiraciones de atributo*. Una aspiración de movimiento, cuando se satisface, revoca la clasificación tabú del movimiento. Una aspiración de atributo, cuando se satisface, revoca el estado tabú-activo del atributo.

Las primeras aplicaciones empleaban un criterio simple de aspiración que consiste en eliminar una clasificación tabú de un movimiento de ensayo cuando el movimiento conduce a una solución mejor que la mejor obtenida hasta el ahora. Este criterio se sigue



usando ampliamente, sin embargo puede haber otros criterios de aspiración efectivos para mejorar la búsqueda.

Puede usarse una *Relajación de la prohibición* consistente en que si la nueva solución pertenece a la lista tabú, solo se rechaza si su valor no alcanza un nivel de aspiración 'A'. Y este 'A' puede ser un umbral definido por el analista o el mejor valor de D-error encontrado hasta el momento.

Existe una clasificación para la *elaboración de la lista Tabú* o lista de prohibidos, es decir, para la forma de almacenamiento de los datos: *Memoria Explícita*, se memoriza en la lista tabú toda la solución ya visitada (Ej.- (1, 0, 1, 0, 1, 1)) y *Memoria Atributiva*, se memoriza parte de la solución, sólo los atributos o características importantes de las soluciones ya visitadas (Ej.- (1, *, *, *, *, 1)).

Se conoce como *permanencia Tabú* a la duración que un atributo permanece con status tabú, es decir, el número de iteraciones que pasarán antes de que dicho atributo pueda ser modificado. Tiene una implementación sencilla ya que se trata de crear otra memoria en la que se asocie el atributo modificado con el número de iteraciones que será tabú. El criterio de aspiración permite ignorar el estatus tabú en determinadas circunstancias.

A la hora de *finalizar el proceso* pueden tenerse en cuenta dos condiciones: (i) que se haya realizado un número de iteraciones k sin mejorar el valor de Z , (ii) que se considere que el valor obtenido es cercano al óptimo esperado.

Existen diferentes tipos de memoria, *memoria a corto y a largo plazo*, ambas llevan asociadas sus propias estrategias y atributos, y actúan en ámbitos diferentes.

- **A corto plazo:** Almacena atributos de soluciones recientemente visitadas, y su objetivo es explorar a fondo una región dada del espacio de soluciones. En ella etiquetamos como tabú determinadas soluciones (o algunos atributos) y no permitimos que se visiten durante un número de iteraciones.

La memoria basada en lo reciente consiste en cambiar unos valores de atributo por otros, haciendo que el nuevo valor pase a ser tabú durante un número determinado de veces.

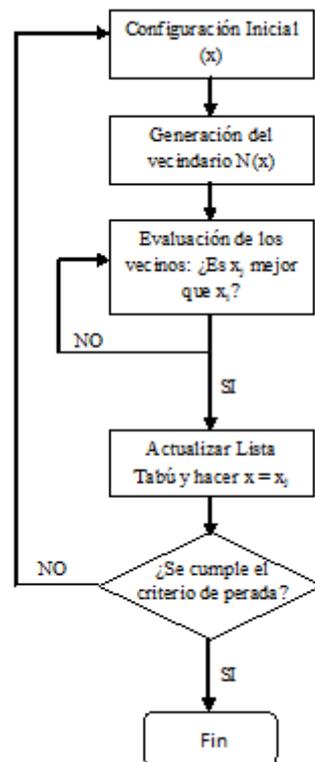


Fig. 8.4.- Algoritmo de búsqueda Tabú.

La memoria basada en atributos es el tipo más utilizado en el modelo a corto plazo, en ella (i) se etiquetan como tabú los atributos aparecidos en las soluciones visitadas recientemente, (ii) prohíbe visitar soluciones que contienen atributos no deseados y (iii) previene el ciclado.

```

Elegir  $x \in X$ ;
 $x^* \rightarrow x$ ;
do {  $iter + 1 \rightarrow iter$ ;
    Encontrar  $x' \in N(x) \setminus T(x)$  tal que  $f(x')$  sea mínimo;
     $x' \rightarrow x$ ;
    Actualizar  $T(x)$ ;
    if ( $f(x) < f(x^*)$ ) {  $x^* \rightarrow x$ ;
                         $iterToBest \rightarrow iter$ ; }
} while (mientras no se satisfaga el criterio de parada);
  
```



- **A largo plazo:** Es una memoria basada en Frecuencias, es decir, almacena las frecuencias de las ocurrencias de atributos en las soluciones ya visitadas tratando de identificar o diferencias regiones.

Se maneja un vector H , que contiene la información a largo plazo $H(i) = j$ lo que indica que “Durante las últimas h iteraciones del algoritmo, el i -ésimo bit fue cambiado j veces”.

La memoria a largo plazo emplea las frecuencias para penalizar o premiar (según convenga) movimientos que utilizan atributos muy usados en el pasado. Para tomar una correcta decisión acerca de qué próximo paso a seguir, es mejor mirar el contenido de la memoria a largo plazo.

Estrategias de búsqueda avanzadas

Existen varias clasificaciones de las estrategias para tratar de continuar la búsqueda hacia soluciones mejores. Una de ellas es:

- ***Intensificar:*** Consiste en regresar a buenas regiones ya exploradas (*soluciones de élite*) para estudiarlas en más profundidad y modificar las reglas de selección para inducir características identificadas como buenas.
- ***Diversificar:*** Consiste en visitar nuevas áreas del espacio de soluciones no exploradas anteriormente. Para ello se modifican las reglas de selección con el fin de incorporar a las soluciones atributos que no han sido usados frecuentemente. Se puede reiniciar de forma aleatoria o mediante construcción con frecuencias.

Las soluciones de élite se identifican típicamente como elementos de un grupo regional en estrategias de **intensificación** de período intermedio, y como elementos de diferentes grupos en estrategias de **diversificación** de período largo.

Capítulo 9

EJEMPLO DE APLICACIÓN



CAPÍTULO 9. EJEMPLO DE APLICACIÓN.

Para una mejor comprensión del algoritmo de solución se plantea un ejemplo de aplicación consistente en la red mostrada a continuación. Se puede suponer que la red representa un área urbana con una serie de zonas periféricas (nodos 1, 2, 3, 13, 14 y 15) y un centro urbano conformado por un eje principal (4-12).

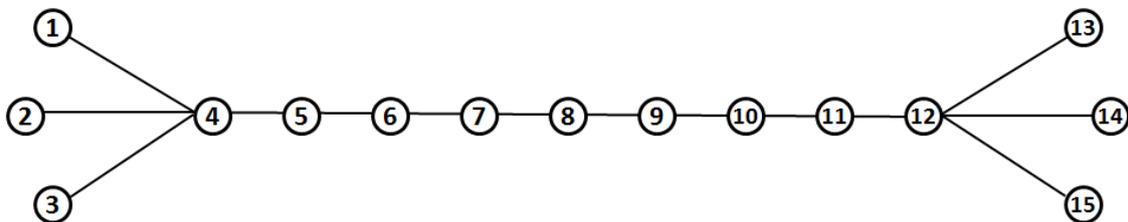


Fig. 9.1.- Red ejemplo.

Cada nodo de la red anterior es un centroide que genera y/o atrae viajes, según la siguiente matriz O/D representada en la tabla 9.1.

Además, sobre esta red vial discurren 7 líneas de transporte público con las características descritas en la tabla 9.2.

Etapas 1: Como se ha dicho en el capítulo anterior, la primera etapa del algoritmo consistirá en dividir la red en arcos más o menos equidistantes de tal manera que todos los nodos de la nueva red son puntos candidatos a ser parada. En este caso de ejemplo, se ha discretizado la red en arcos de 100 metros. Posteriormente, se debe zonificar la red

en zonas de equidistancia de paradas. Para simplificar, y en concordancia con la descripción de la red realizada en el primer párrafo, se supondrá que solamente se tienen dos zonas; la zona *d1* que engloba las zonas periféricas y la zona *d2* que cubre todo el eje central. La red discretizada y la zonificación realizada se muestran en la figura 9.2.

Tabla 9.1.- Matriz O/D para la red ejemplo.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Σ
1	0	0	0	40	0	123	32	60	111	0	101	0	99	50	69	685
2	0	0	0	78	61	67	62	82	99	40	68	57	45	57	50	767
3	0	0	0	130	49	71	28	110	0	115	72	109	98	50	72	903
4	0	0	0	0	55	49	0	143	0	127	50	79	90	76	94	763
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	32	0	32
6	0	0	0	0	0	0	136	75	28	46	23	105	76	85	24	599
7	0	0	0	0	0	0	0	0	63	28	101	27	101	72	84	475
8	0	0	0	0	0	0	0	0	142	118	0	0	41	79	0	381
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	150	39	81	57	50	74	451
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	54	74	132	78	80	418
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	144	0	35	32	210
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	88	48	0	136
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Σ	0	0	0	248	165	310	258	471	444	626	507	676	827	711	578	5821

Tabla 9.2.- Líneas de transporte público en la red ejemplo.

Línea	Intervalo (min)	Origen-Destino
1	6	1-13
2	8	2-13
3	6	2-14
4	8	3-15
5	10	3-13
6	8	3-14
7	4	4-12

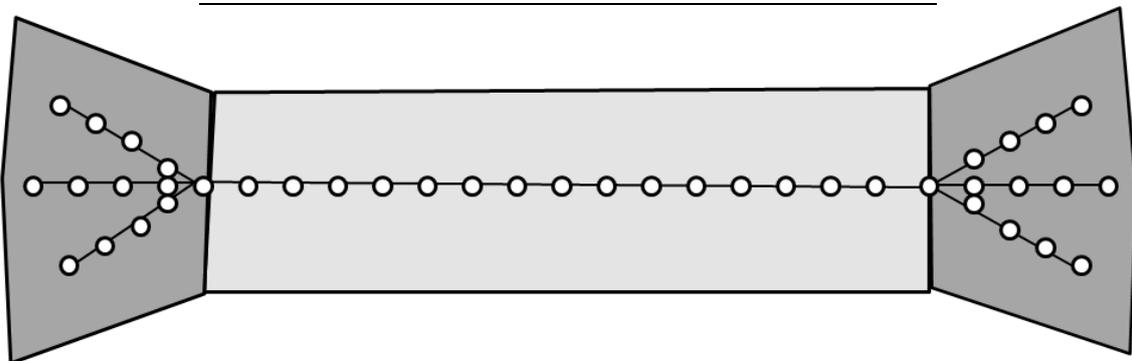


Fig. 9.2.- Zonificación realizada y discretización de la red.

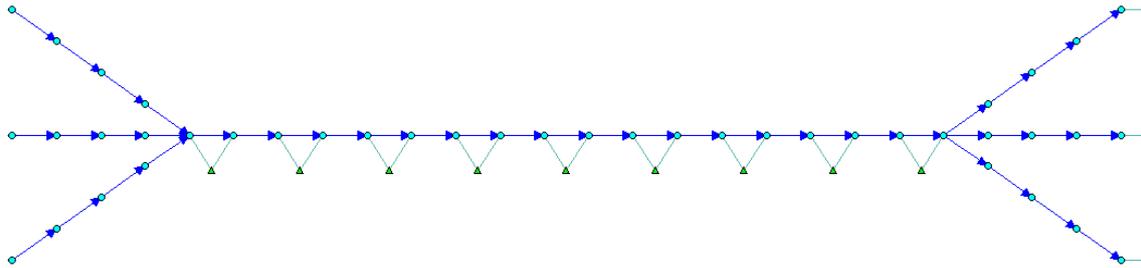


Fig. 9.3.- Codificación de la red ejemplo en el software ESTRAUS.

El siguiente paso será definir un vector inicial $[d]:[d_1, d_2]$ en el que cada componente establezca el distanciamiento entre las paradas para esa zona. Por ejemplo, se va a empezar con el vector $[200, 200]$, es decir, espaciamiento uniforme cada 200 metros en toda la red. Con este vector las paradas se ubicarían de la forma mostrada en la figura 9.4.

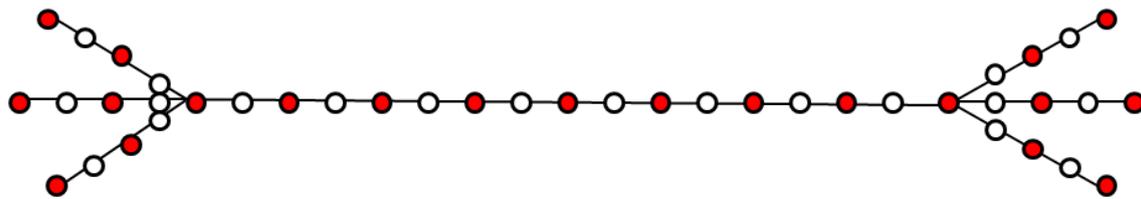


Fig. 9.4.- Ubicación inicial de las paradas.

Etapa 2: Una vez que las paradas se han ubicado, se aplica el modelo de reparto modal-asignación, obteniéndose las asignaciones en los modos de transporte privado y público y los valores de tiempos necesarios para el cálculo de la función objetivo del nivel superior.

Etapa 3: Con los valores obtenidos en la etapa 2 se calcula la función de costes sociales del nivel superior: $Z_0 = 5524 \text{ €}$.

Etapa 4: Aplicación del algoritmo Hooke-Jeeves:

En esta etapa se supondrá que se utiliza el algoritmo Hooke-Jeeves (HJ), este algoritmo en su primer movimiento altera el valor de la primera componente del vector con un valor igual al salto definido. En este caso, si se quiere que se pasen por todos los nodos, el salto será de 100, por lo tanto, en el primer movimiento el algoritmo generará los siguientes vectores: $d_1:[100, 200]$ y $d_2: [300, 200]$. El programa reubica las paradas de

bus para cada vector (figura 9.5) y vuelve a aplicar el modelo de Partición modal-asignación.

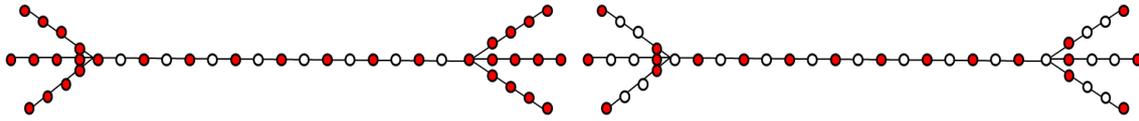


Fig. 9.5.- Ubicaciones de paradas de bus en el primer movimiento.

De cada vector, se calcula de nuevo las respectivas funciones de coste: $Z_1 = 5801 \text{ €}$ y $Z_2 = 5499 \text{ €}$.

El último paso del algoritmo HJ será comparar los valores de la función objetivo (función de costes) Z_0 , Z_1 y Z_2 y quedarse con aquel que de menor valor. En este caso, será Z_2 , que corresponde al vector $[300, 200]$.

En el siguiente movimiento del algoritmo HJ se convierte $Z_0 = Z_2$, y se vuelve a ejecutar de idéntica manera para la segunda componente del nuevo vector $[300, 200]$, obteniéndose los vectores $[300, 100]$ y $[300, 300]$.

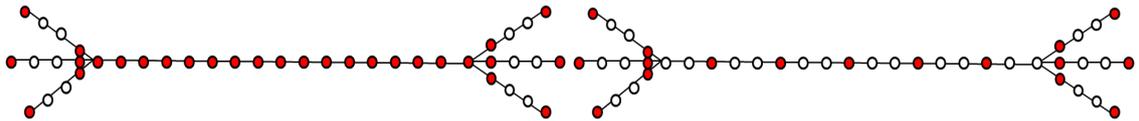


Fig. 9.6.- Ubicaciones de paradas de bus en el segundo movimiento.

Las funciones de coste serán respectivamente: $Z_1 = 5722 \text{ €}$ y $Z_2 = 5505 \text{ €}$, con lo que el valor mínimo seguiría siendo Z_0 .

Llegado a este punto, se ha concluido una iteración completa del vector, con una $Z^1 = 5499 \text{ €}$ para el vector $[300, 200]$.

La segunda iteración de HJ, se realiza de manera análoga a la anterior: en primer lugar se varía el primer componente del vector, generando los vectores $[200, 200]$, que ya ha sido analizado pero que vuelve a entrar en el algoritmo, y $[400, 200]$. Las funciones de coste tendrán un valor de $Z_1 = 5524 \text{ €}$ y $Z_2 = 5340 \text{ €}$ respectivamente. El mínimo valor de Z_0 , Z_1 y Z_2 será por lo tanto este último, con lo que $Z_0 = Z_2$.

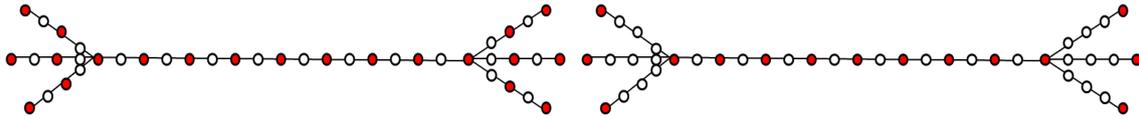


Fig. 9.7.- Ubicaciones de paradas de bus en el primer movimiento: iteración 2.

En la siguiente etapa se varía el segundo componente, obteniendo los vectores: [400, 100] y [400, 300] con valores de $Z_1 = 4619$ € y de $Z_2 = 5484$ €, con lo que el menor valor vuelve a ser Z_0 .

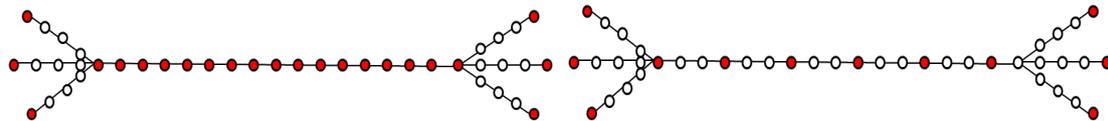


Fig. 9.8.- Ubicaciones de paradas de bus en el segundo movimiento: iteración 2.

Por lo tanto, concluida la segunda iteración, se obtiene que $Z^2 = 5340$ €.

Como $Z^1 \neq Z^2$, se continúa iterando.

La tercera iteración del algoritmo partirá del vector [400, 200], y en la primera etapa genera los vectores [300, 200], que vuelve a entrar en el algoritmo, y [500, 200], con un valor de función objetivo de $Z_1 = 5499$ € y $Z_2 = 5388$ €, con lo que Z_0 sigue siendo el valor mínimo.

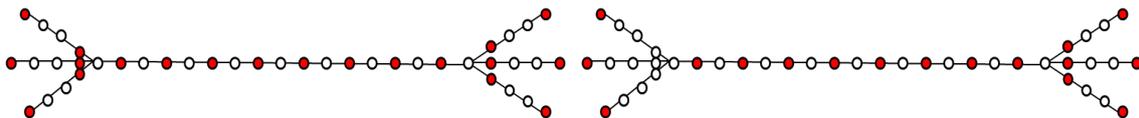


Fig. 9.9.- Ubicaciones de paradas de bus en el primer movimiento: iteración 3.

Con estos valores, se varía la segunda componente del vector, obteniendo los vectores [400, 300] y [400, 100] que vuelven a entrar al algoritmo. Por lo tanto, el menor valor de la función de costes seguirá siendo Z_0 , con lo que $Z^3 = 5340$ €.

Finalmente, en esta ocasión se tiene que $Z^2 = Z^3$ con lo que se para el algoritmo.

En la tabla 9.3. se muestra la evolución seguida en el algoritmo, resaltando el valor mínimo de Z en cada iteración:



Tabla 9.3.- Iteraciones Hooke-Jeeves.

Iteración	Sub-iteración	Vector	Paradas	Z
	1	[200, 200]	21	5524
1	2	[100, 200]	33	5801
1	3	[300, 200]	20	5499
1	3	[300, 200]	20	5499
1	4	[300, 100]	29	5722
1	5	[300, 300]	17	5505
2	6	[300, 200]	20	5499
2	7	[200, 200]	21	5524
2	8	[400, 200]	15	5340
2	9	[400, 100]	23	5619
2	10	[400, 300]	12	5484
3	11	[400, 200]	15	5340
3	12	[300, 200]	20	5499
3	13	[500, 200]	14	5388
3	14	[400, 300]	12	5484
3	15	[400, 100]	23	5619
3	16	[400, 200]	15	5340

Etapa 4: Aplicación del algoritmo de búsqueda Tabú:

Suponiendo ahora que se utiliza el algoritmo de búsqueda Tabú (TS), el primer movimiento será de búsqueda de todos los “vecinos” del vector inicial [200, 200], con valor de $Z_0 = 5524$ €. Este vector se guardará en un listado de candidatos. El “vecindario” de dicho vector será estará formado por los vectores: d_1 : [100, 200]; d_2 : [300, 200]; d_3 : [200, 300] y d_4 : [200, 100].

Tomando los datos del caso de aplicación de Hooke-Jeeves, los valores de la función de costes serán respectivamente: $Z_1 = 5801$ €, $Z_2 = 5499$ €, $Z_3 = 5542$ € y $Z_4 = 5741$ €.

El mínimo valor de Z será Z_2 que corresponde al vector [300, 200]. Por lo tanto, en la iteración 1, se tiene $Z^1 = 5499$ € y se guarda este vector en la lista de candidatos donde ya se encuentra [200, 200].

En la siguiente iteración, se busca el vecindario del vector [300, 200] que estará formado por los vectores: [400, 200], [300, 300] y [300, 100]. Nótese que en este conjunto faltaría el vector [200, 100]. Esto se debe a que, al haber sido ya estudiado en



la iteración anterior y no haber mejorado el valor de Z se ha incluido en la lista de vectores prohibidos (lista Tabú) y, por lo tanto, no se analiza de nuevo.

Los valores de la función de coste serán $Z_1= 5340$ €, $Z_2= 5505$ € y $Z_3= 5722$ € respectivamente. Por lo tanto, el valor mínimo corresponderá al vector [400, 200], con lo que $Z^2 = 5340$ € y se añade este vector a la lista de candidatos.

Como $Z^1 \neq Z^2$, se continúa iterando.

En la tercera iteración, los vecinos del vector [400, 200] serán: [500, 200], [400, 100] y [400, 300], con valores respectivos $Z_1= 5388$ €, $Z_2= 5619$ € y $Z_3= 5484$ €. Ninguno de estos valores es menor del inicial, por lo tanto, $Z^3= 5340$.

Finalmente, en esta ocasión se tiene que $Z^2=Z^3$ con lo que se para el algoritmo.

El valor final de Z será la menor de la lista de candidatos, que corresponde al vector [400, 200] con un valor de 5340 €, coincidiendo la solución con la del algoritmo Hooke-Jeeves.

En la tabla 9.4. se muestra la evolución seguida en el algoritmo, resaltando el valor mínimo de Z en cada iteración:

Tabla 9.4.- Iteraciones Tabu Search.

Iteración	Sub-iteración	Vector	Paradas	Z
	1	[200, 200]	21	5524
1	2	[100, 200]	33	5801
1	3	[300, 200]	20	5499
1	4	[200, 300]	18	5542
1	5	[200, 100]	29	5741
2	6	[400, 200]	15	5340
2	7	[300, 300]	17	5505
2	8	[300, 100]	29	5722
3	9	[500, 200]	14	5388
3	10	[400, 100]	23	5619
3	11	[400, 300]	12	5484

En la figura 9.10 se representan los valores de la función de costes obtenida en función del número de paradas, para cada algoritmo de búsqueda utilizado. En dicha gráfica se puede ver claramente el valor mínimo obtenido coincidente en ambos algoritmos y



además se aprecia que ambos han sido capaces de saltarse mínimos locales. Por otra parte, en la figura 9.11 se grafica el valor de la función objetivo a lo largo de las sub-iteraciones de cada algoritmo. Ambos llegan al óptimo en 3 iteraciones, sin embargo, el número de vectores analizados en cada iteración es mayor en Hooke-Jeeves debido a que repite análisis de vectores repetidos, mientras que Tabú los no válidos los descarta y no vuelve a pasar por ellos.

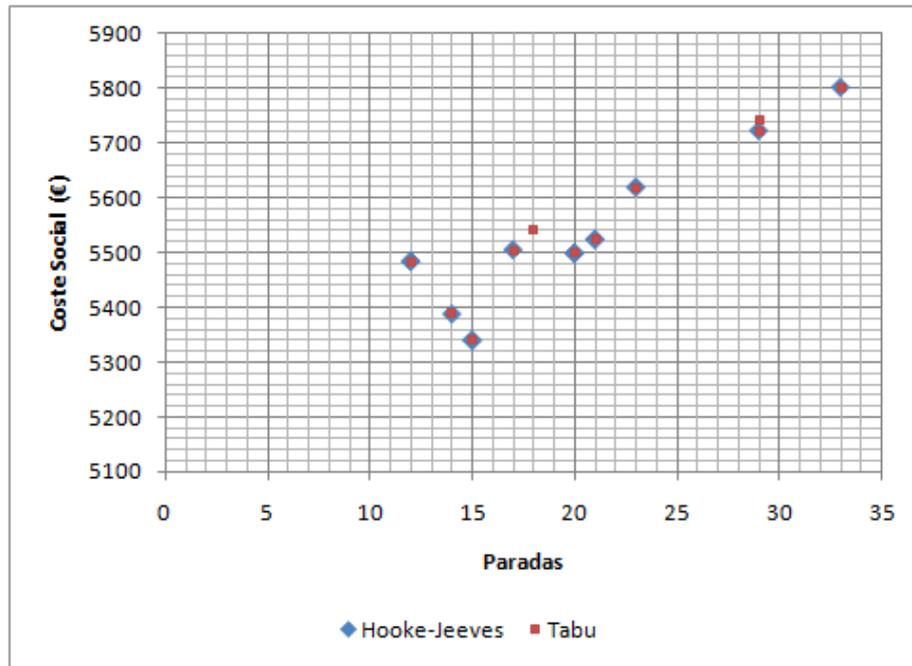


Fig. 9.10.- Coste Social en función del número de paradas. Comparativa entre HJ y TS.

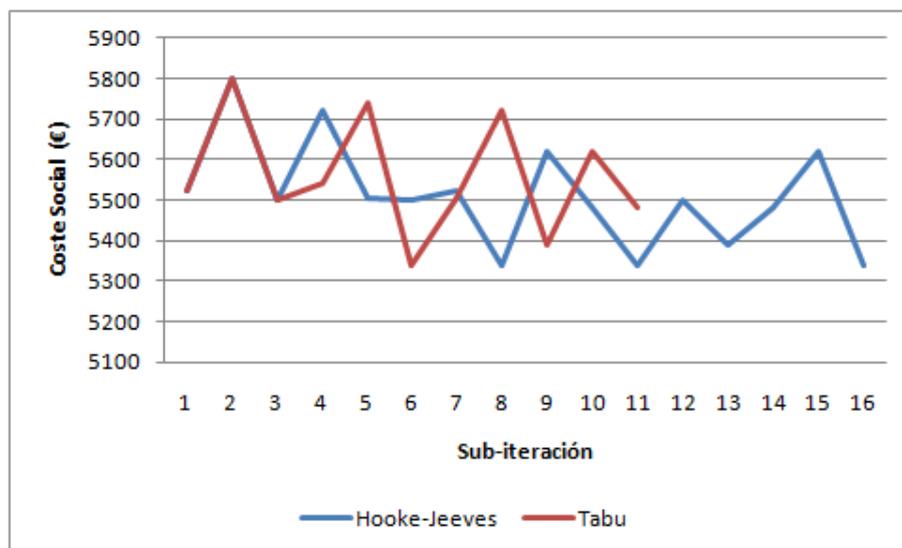


Fig. 9.11.- Evolución del Coste Social. Comparativa entre HJ y TS.

**PARTE IV: MODELIZACIÓN DE OPERATIVA E
INCIDENCIAS EN LA RED A NIVEL
MACROSCÓPICO**

Capítulo 10

JUSTIFICACIÓN



CAPÍTULO 10. JUSTIFICACIÓN.

Una vez que un pasajero aborda un vehículo en la parada, el tiempo de viaje sobre dicho vehículo (t_l) estará determinado por: (Fernández y Tyler, 1999)

- Los tiempos de viaje en el arco (Tv), función del nivel de congestión que exista sobre la red vial (flujos de vehículos de transporte privado y transporte público), velocidad del bus (V_r) y longitud del arco (L_r).
- Demoras debidas a señales de tráfico (Tc) que encuentre a su paso.
- La duración de las detenciones a realizar en las paradas (TBS) (Larraín y Muñoz, 2008).

Por lo tanto, el tiempo de viaje en vehículo será:

$$t_l = \sum_{\kappa} Tv_{\kappa} + \sum_c Tc_c + \sum_n TBS_n \quad (10.1)$$

donde κ , c y n representan el número de arcos, intersecciones semaforizadas y paradas respectivamente.

Así, siguiendo el ejemplo de aplicación del capítulo 9, se supone ahora que en el eje central de la red existe un tramo semaforizado (figura 9.1). Se tiene así un tramo de 1400 metros, en el cual se encuentran ubicadas 7 paradas (cada 200 metros) y 5 semáforos (ver tabla 10.1), los cuales tienen todos el mismo ciclo (90 sg), con una

proporción de verde de 0.6 y están coordinados para el transporte privado para una velocidad de 40 km/h.

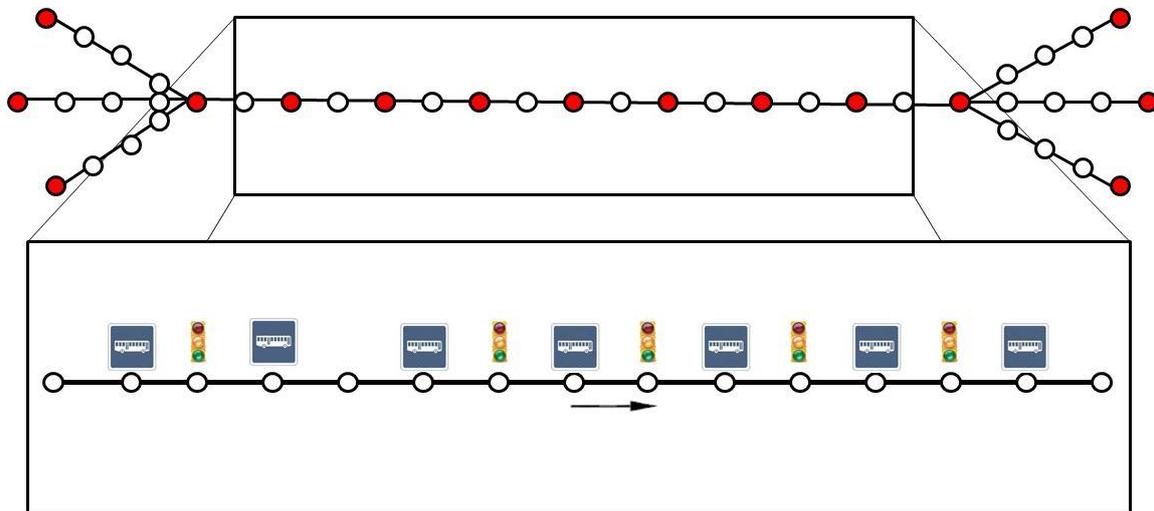


Fig. 10.1.- Eje urbano ejemplo.

Tabla 10.1.- Ubicación de paradas y semáforos en el eje.

Punto	Ini	P1	S1	P2	P3	S2	P4	S3	P5	S4	P6	S5	P7	Fin
Metros	0	100	200	300	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400

Para simplificar este ejemplo se supondrá además que todas las paradas tienen una misma demanda y, por lo tanto, el tiempo de operación del bus en ellas será idéntico e igual a 30 sg.

Si se representa la trayectoria de un bus de una línea de transporte público a lo largo de este tramo en un diagrama espacio tiempo, la diferencia entre el instante inicial y final marcará la velocidad comercial del bus en este eje. Atendiendo a esto, se pueden considerar varios escenarios:

Escenario A: tiempo de viaje dependiente del tiempo en arco y en la parada de bus.

Se comienza con el denominado *Escenario A* en el que se considera solamente el tiempo de recorrido en el arco más el tiempo de detención en la parada debido exclusivamente al tiempo de operación. Representando este escenario en el diagrama espacio-tiempo, se obtiene el perfil mostrado en la figura 10.2, con una velocidad comercial de 14.74 km/h.



Escenario B: gestión e incidencias de la red vial.

Tal y como se ha expuesto al inicio de este apartado, en la ecuación (10.1) se incluyen los tiempos de detención en semáforos. Efectivamente, en una coordinación diseñada para una velocidad constante y sin detenciones intermedias, superior a la del bus, es lógico pensar que éste llegará a, al menos, un semáforo en la fase de rojo. Por ello, en el llamado *Escenario B*, se añade a los tiempos del escenario anterior los tiempos de demora debidos a semáforos. En la figura 10.2 puede apreciarse que el bus alcanza el final del eje más tarde que en el caso anterior, con lo que la velocidad comercial cae más de 1 km/h para el ejemplo propuesto hasta los 13.55 km/h.

Además es común que en zonas urbanas se permita el estacionamiento de vehículos en el margen derecho de la vía, con lo que el flujo en este carril aumentará debido a los vehículos en busca de aparcamientos, así como sufrirá interrupciones puntuales debidos a las maniobras de estacionamiento o a vehículos mal estacionados. Esto produce cuellos de botella y, lógicamente, disminuye la capacidad del vial y genera demoras al resto de los usuarios.

Si se asume que solamente en los últimos 400 metros del eje ejemplo se permite el estacionamiento y, suponiendo que el bus comparte vía con el automóvil, es lógico pensar que la velocidad del bus se reduce ligeramente, por lo tanto, representando nuevamente la trayectoria del bus a través del eje en el diagrama espacio-tiempo se debe disminuir la pendiente de la recta (velocidad) en ese tramo (línea punteada en la figura 10.2). La representación conjunta de todos estos fenómenos hace que la velocidad comercial vuelva a reducirse, llegando a los 12.73 km/h.

Escenario C: congestión en las paradas.

Finalmente, puede suceder que los buses, bien por una mala coordinación entre líneas, bien por un flujo de buses alto o demandas elevadas, lleguen agrupados a las paradas. En estos casos, los tiempos de detención en paradas no solamente se deben a los tiempos de operación sino que, además, deben esperar a que el bus precedente despeje la parada para poder entrar en ella. Introduciendo este nuevo tiempo en el diagrama de la figura 10.2 se obtiene el perfil del representado por la línea discontinua. En esta figura puede observarse que los tiempos en paradas aumentan notablemente con

respecto a los escenarios previos, lo que conlleva una nueva bajada de la velocidad comercial hasta los 10 km/h.

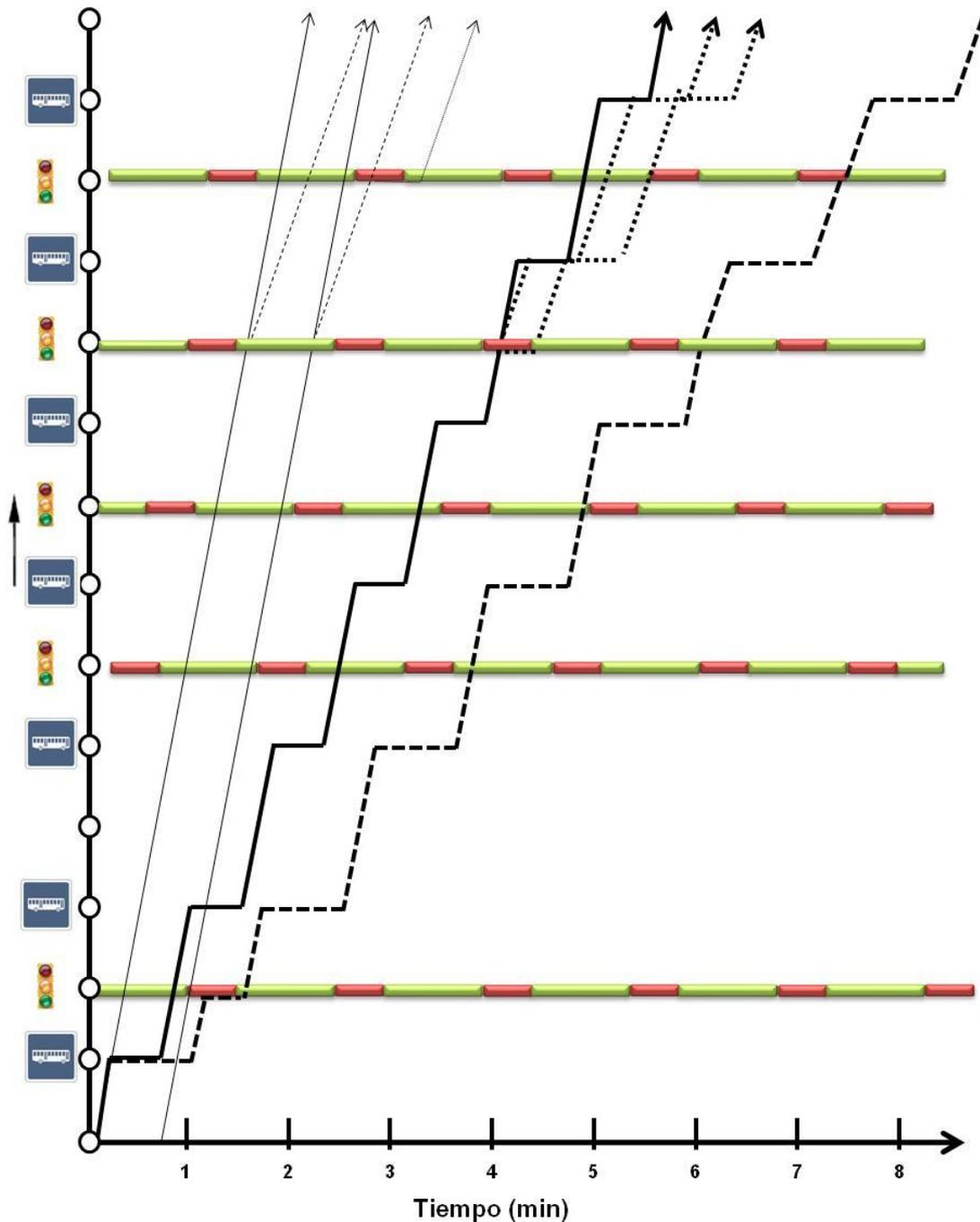


Fig. 10.2.- Diagramas espacio-tiempo para cada escenario considerado.

En estos pequeños ejemplos queda de manifiesto la importancia de las operaciones e incidencias de la red vial y de la red de transporte público en la operación del mismo. Es



por ello que en los apartados siguientes se exponen modelos que tratan de replicar estos fenómenos de cara a representar de una forma más realista las condiciones reales en la red vial.

Dichos modelos se han estructurado en los cinco capítulos que siguen: los dos primeros se refieren a la gestión de la red vial donde se incluyen los elementos de control de tráfico y las zonas de estacionamiento, y los capítulos antepenúltimo y penúltimo tratan la operación de los buses en paradas congestionadas.

Capítulo 11

MODELIZACIÓN DEL CONTROL DEL TRÁFICO



CAPÍTULO 11. MODELIZACIÓN DEL CONTROL DEL TRÁFICO.

11.1. INTRODUCCIÓN.

Los vehículos de transporte público comparten en la mayoría de las ocasiones la red vial con el tráfico privado. En esta red, los elementos de control o semáforos constituyen puntos de interrupción del flujo y por consiguiente, demoras en el transporte público como usuario de la red vial.

Es frecuente en ejes de las ciudades que los elementos de control estén coordinados de tal forma que las fases de verde se van sucediendo facilitando el paso sucesivo de los vehículos. Dicha coordinación “progresiva” suele estar diseñada para una velocidad concreta de los vehículos.

Sin embargo, tal y como se ha visto en el ejemplo anterior, mientras los vehículos privados pueden mantener esta velocidad a lo largo del corredor, el transporte público debe detenerse además en las paradas de bus, con lo que la coordinación semafórica no puede ser aprovechada en su totalidad. Debido a esta situación, los vehículos de transporte público deben detenerse en más ocasiones aumentando las demoras y, consecuentemente, disminuyendo la velocidad comercial (figura 11.1).

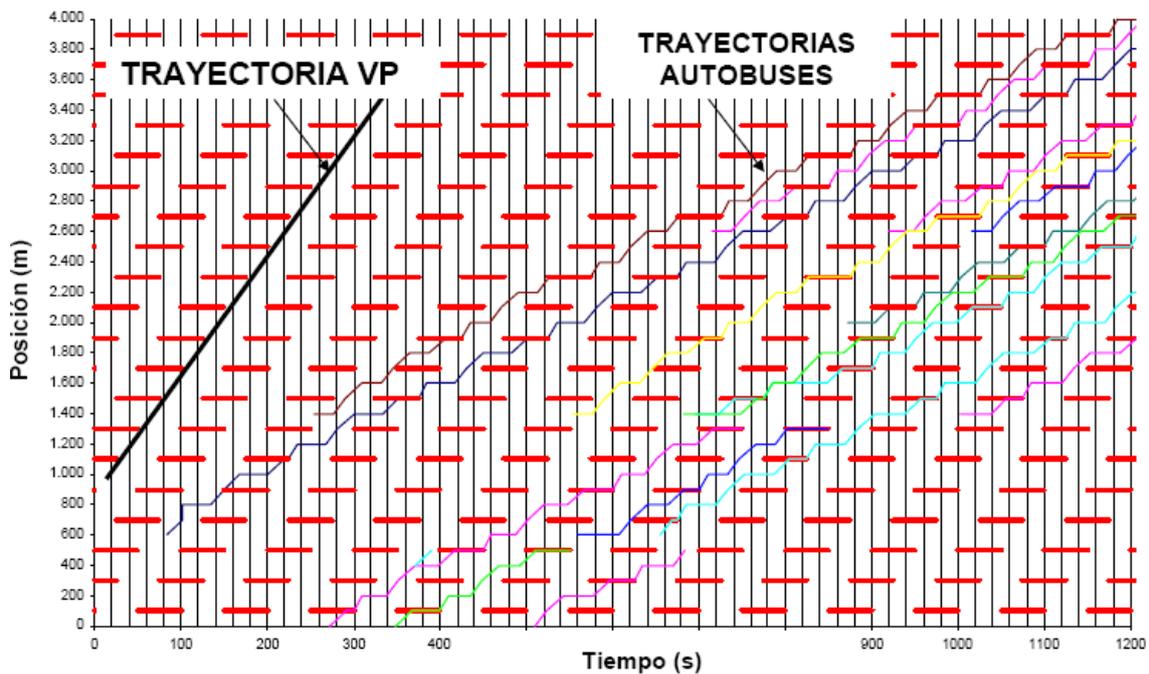


Fig. 11.1.- Diagramas espacio-tiempo con coordinación semafórica para transporte privado (F. Robusté, 2006).

Existen alternativas a esta coordinación para adecuarla a la velocidad media del transporte público teniendo en cuenta las medias y desviaciones de los tiempos de parada en las paradas de bus (figura 11.2). Otras actuaciones consisten en la priorización semafórica al transporte, algo que debe analizarse en detalle pues, como ha sucedido en algunas ciudades, se pueden penalizar gravemente los corredores transversales y a las líneas de transporte público que discurren por ellos.

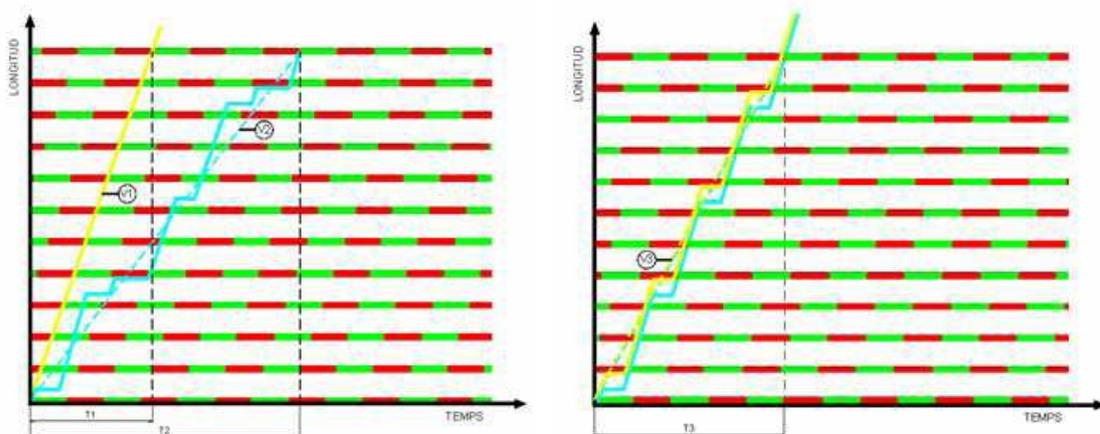


Fig. 11.2.-Coordinación semafórica para transporte privado y transporte público.



11.2. MODELO EN ELEMENTOS DE CONTROL.

Las intersecciones son modeladas con funciones tradicionales de demora uniforme a través de la siguiente relación (Valencia y Fernández, 2007):

$$d_{lk} = (\delta_{lk} + l_{lk}) \quad (11.1)$$

donde d_{lk} es la demora total de buses en intersección k ; δ_{lk} es la demora por vehículo detenido en la intersección k y l_{lk} es el tiempo medio perdido por aceleración y frenado en la intersección k .

Las demoras producidas por vehículo detenido en intersecciones se producen principalmente por la programación de semáforos que puede explicarse mediante la teoría de tráfico tradicional con la siguiente expresión (Saka, 2001).

$$\delta_{lk} = ((C_k - g_k)/C_k) \cdot [0.50(C_k - g_k)] \quad (11.2)$$

donde C_k es el tiempo de ciclo del semáforo de la intersección k ; g_k el tiempo de verde efectivo de la intersección k ;

La componente del tiempo medio perdido por aceleración y frenado (l_{lk}) de la ecuación (11.1) se describe como:

$$l_{lk} = \frac{1}{2} \left(\frac{V_r}{a} + \frac{V_r}{f} \right) \quad (11.3)$$

Donde a y f son las tasas de aceleración y frenado de los buses, respectivamente [m/s²].

Capítulo 12

MODELIZACIÓN DE INCIDENCIAS EN LA RED VIAL



CAPÍTULO 12. MODELIZACIÓN DE INCIDENCIAS EN LA RED VIAL.

12.1. INTRODUCCIÓN. ESTADO DEL ARTE.

Este capítulo tiene como objetivo cuantificar la influencia de vehículos mal estacionados y maniobras de aparcamiento en los tiempos medios de viaje y en la capacidad del arco, en función del tiempo de duración de los sucesos, número de maniobras y flujo asignado.

En la mayoría de las ciudades del mundo se están produciendo severos problemas debido al aumento del tráfico vehicular, con importantes consecuencias en términos de demoras, consumos de combustible, accidentes, ruido y contaminación.

En particular, el uso y crecimiento desmesurado del vehículo privado y la imposibilidad de ampliar la infraestructura urbana, configuran un panorama muy preocupante en términos de la respuesta que deba darse ante estas situaciones. Tales hechos se ven potenciados a nivel puntual si se consideran los problemas debidos a maniobras de estacionamiento, o, mismamente, los perniciosos efectos de los vehículos mal estacionados.

El problema se acentúa cuando en estos viales aparecen incidentes que, temporalmente, bloquean un carril. Se entiende por incidente cualquier evento que, de manera temporal, reduce la capacidad de la vía, como por ejemplo un accidente de tráfico, derrames de



materiales peligrosos, (Faradyne, 2000) o a vehículos mal estacionados y maniobras de aparcamiento.

Las plazas de aparcamiento existentes, en las calles urbanas y su usual saturación, provocan un aumento del tráfico superfluo, así como una disminución de la velocidad en búsqueda de una plaza libre y detenciones al resto de vehículos durante las maniobras de entrada o salida.

Esto conlleva inevitablemente una reducción de la capacidad ofertada por el vial, con un aumento exponencial de las demoras que no suelen ser consideradas en los estudios de movilidad, pero que, por ejemplo, pueden llegar a ser de gran importancia en la planificación de frecuencias y tiempos de viaje de sistemas de transporte público urbano.

En la literatura mundial pueden encontrarse diferentes publicaciones que tratan la reducción de la capacidad de viales debido a incidentes. Por ejemplo, (Goolsby, 1971) estimó esta reducción de la capacidad, concluyendo que un incidente que bloquea un carril de tres disponibles reduce aproximadamente un 50% la capacidad del vial; si el incidente bloquea 2 de 3 carriles, se reduce un 79% la capacidad, y, finalmente, si se bloquea el arcén el flujo de tráfico se reduce un 33%.

Mc Shane y Roess (1990) establecen que una reducción de capacidad del 10% puede cambiar las condiciones de operación de la vía al rango de sobresaturación, dependiendo del flujo en el vial y del tiempo de duración de esta reducción.

Gordon et al., (1996) establece que el bloqueo de un carril provoca una reducción del 65% y 51% para vías de 2 y 3 carriles respectivamente. (Smith et al., 2003) en una investigación más reciente sobre datos de carreteras de la región de Hampton modela la reducción de capacidad por incidentes como una variable aleatoria de función de distribución Beta. Con ello estima una reducción de la capacidad de un 63% y 77% para uno y dos carriles bloqueados de un vial de 3 carriles, comparando sus resultados con los del estudio de Goolsby.

Asimismo, el Manual de Capacidad (HCM, 2000) propone unos valores estimados de reducción de capacidad, en función del número de carriles bloqueados y el número de carriles totales por sentido.



Al-Deek et al., (1995) aplicó la teoría de ondas de choque para la estimación de demoras debidas a uno o varios incidentes. Más recientemente, (Baykal-Gursoy et al., 2006) compara las demoras obtenidas debido a incidentes utilizando microsimulaciones, con las obtenidas aplicando el modelo de colas $M/M/\infty$ con los procesos de servicio modelizados con Markov que él mismo propuso en un artículo anterior, (Baykal-Gursoy y Xiao, 2004), en el que los procesos de llegada y salida distribuyen Poisson.

En lo que respecta a la influencia de las maniobras de estacionamiento y el aparcamiento en viales sobre la reducción de capacidad y la congestión de tráfico, Valleley (1997) establece una relación entre el número de vehículos aparcados y la reducción de anchura y capacidad del vial. Chick (1996) obtiene unos factores de reducción de la capacidad en función del número de carriles y del número de maniobras de estacionamiento por hora, resultados que aparecen en el HCM 2000. Yousif y Purnawan (1999) analizan las demoras ocasionadas por las maniobras de entrada y salida de las plazas de aparcamiento, diferenciando entre estacionamiento en paralelo y oblicuo, constatando que las maniobras de entrada llevaban más tiempo que las de salida, siendo el aparcamiento en paralelo menos problemático que el oblicuo.

En otras líneas de investigación, Box (2004) analiza los accidentes debidos al estacionamiento en viales, así como trata el tema de cómo influyen las maniobras en la congestión. Por otro lado, Ukpong et al. (2005) comparan los niveles de emisiones de viales con y sin aparcamiento, así como los tiempos de viaje en ambos casos.

Finalmente, Tanaka et al. (2006) analizan el comportamiento de los conductores ante una situación similar a vehículos mal estacionados en el arcén que invaden parte del carril adyacente, recogiendo mediante una máquina de realidad virtual, las trayectorias de los vehículos, analizando las maniobras de cambio de carril, percepción del conductor, etc.

En este capítulo se analiza el vehículo mal estacionado separadamente de un incidente como tal, debido a que, en las observaciones realizadas, el comportamiento de los vehículos era distinto en ambos casos. Mientras que en presencia de un incidente sucede el fenómeno denominado “*rubbernecking*”, ante un vehículo mal estacionado, este fenómeno disminuye. Se describe el *rubbernecking* como una modificación del comportamiento de los conductores de vehículos de los carriles adyacentes al del



incidente, que al pasar por el punto donde éste se ha producido, tienden a reducir la velocidad, bien por seguridad, bien para ver lo que ha sucedido, creando una reducción adicional de la capacidad. Según Smith y Ulmer (2003), este factor de reducción puede llegar a ser del 10% en cada carril, con lo que la reducción de capacidad obtenida debido a vehículos mal estacionados deberá ser menor. Es por ello que, de aquí en adelante, se va a denominar al vehículo mal estacionado como “suceso”.

En la revisión bibliográfica realizada se ha hecho referencia a artículos que estudian la reducción de la capacidad de un vial y demoras ante incidentes y analizan la influencia de las maniobras de estacionamiento sobre el tráfico. Sin embargo, existen pocas investigaciones acerca de la influencia de un vehículo mal estacionado en la capacidad del vial y demoras, donde, como se ha expuesto, el efecto del *rubbernecking* disminuye, que es uno de los temas que se analizan en este capítulo.

12.2. MODELO DE MICROSIMULACIÓN.

Para la calibración del modelo de microsimulación se han medido las variables más representativas del estado del tráfico en diferentes secciones de los viales del área de estudio. De las espiras implantadas por los servicios técnicos del Ayuntamiento de Santander se han obtenido los datos de flujos, velocidades, ocupaciones e intervalos para las horas punta y fuera de punta de una semana representativa de otoño de 2007. Para los flujos de descarga, debido al reducido porcentaje de vehículos pesados en el interior de la ciudad y la tipología de las intersecciones, se ha optado por aplicar el método de los intervalos (Rode Note 34, TRRL, 1963). Más detalles sobre la calibración del modelo de microsimulación se exponen en el capítulo 20 de esta tesis.

Las principales características del tráfico así definidas constituyen los inputs del software de microsimulación AIMSUN[®] (TSS, 2006), el cuál utiliza el modelo de comportamiento de vehículos (seguimiento y cambio de carril) de (Gipps, 1981, 1986a, 1986b), que establece que la velocidad objetivo será función de la máxima velocidad deseada, la limitación de velocidad del vial y las limitaciones impuestas por el vehículo precedente.

El tiempo medio de viaje (TT) de un vehículo i en un tramo s viene dado por la expresión:

$$TT_{is} = \sum_{i=1}^N tt_{is} / N \quad (12.1)$$

donde tt_i es el tiempo empleado por el vehículo i en recorrer el tramo s , y N es el total de vehículos que han pasado por el tramo s .

La demora experimentada (dT) por un vehículo i en cruzar el tramo s será:

$$dT_{is} = TT_{is} - \left[\frac{L_s}{\min(SMax_i, S_s \cdot \theta_i)} + \frac{L_t}{\min(SMax_i, S_t \cdot \theta_i)} \right] \quad (12.2)$$

donde S_s es la velocidad límite del tramo s , S_t es la velocidad de giro, θ_i es la aceptación de velocidad del vehículo i , $Smax_i$ es la máxima velocidad deseada por el vehículo i , L_s es la longitud del tramo s y L_t es la distancia del giro t .

Lógicamente, la demora media será:

$$DT_s = \sum_{i=1}^N dt_{is} / N \quad (12.3)$$

12.3. VEHÍCULO MAL ESTACIONADO (“SUCESO”).

Una vez calibrado el modelo de comportamiento de los vehículos en el caso real de la ciudad de Santander, se ha simulado el impacto de sucesos con una duración variable de 15, 30, 45 y 60 minutos en un tramo de carretera urbana de 2 y 3 carriles por sentido.

En total se han realizado 200 repeticiones para cada tipo de vía y duración del suceso, conformando un total de 2000 repeticiones.

A lo largo del arco se han ubicado espiras en diversas secciones para comprobar la variación del comportamiento del tráfico a medida que éste se acerca o aleja del lugar del suceso, tanto aguas arriba como aguas abajo del mismo (figura 12.1), estando el vehículo mal estacionado en el carril derecho en la sección E. Bajo estas condiciones, se va incrementando en la microsimulación el flujo asignado progresivamente desde un valor inicial de 500 veh/h en intervalos de 250 veh/h, analizando el flujo/hora saliente y entrante, las demoras y obteniendo los diagramas flujo-densidad, velocidad-densidad y

flujo-velocidad, diferenciados por carriles para analizar el comportamiento de cada carril según el flujo se aproxima o se aleja del suceso (figuras 12.2. y 12.3).

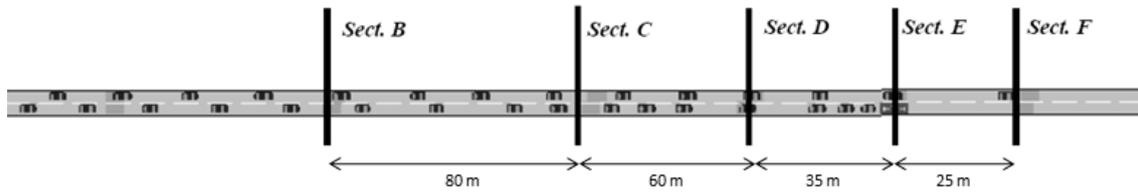


Fig. 12.1.- Ubicación de detectores en el tramo con respecto al incidente.

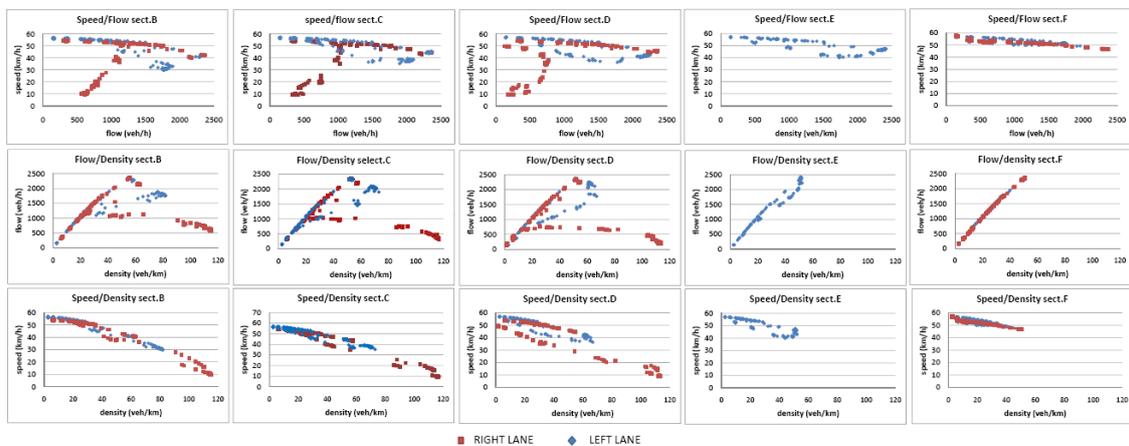


Fig. 12.2.- Relaciones flujo-velocidad; flujo-densidad y velocidad-densidad para una sección de dos carriles.

Los intervalos de tiempo considerados para la toma de datos han sido de 10 minutos, en lugar de los 15 minutos que tradicionalmente se ha establecido como intervalo mínimo recomendado. Este valor ha sido demostrado por Smith y Ulmer (2003) como suficiente para considerar una situación estacionaria de las características del tráfico. Según esta figura, se aprecia cómo la capacidad del carril que presenta el suceso se va reduciendo a medida que la sección considerada se aproxima al mismo. Una vez que éste se supera, se observa que el tráfico se sitúa siempre en la rama estable. Asimismo se aprecia que el carril libre también sufre un empeoramiento de las condiciones del tráfico debido a los cambios de carril, aunque lógicamente en menor medida que en el carril que presenta el suceso, superando ligeramente la capacidad del carril.

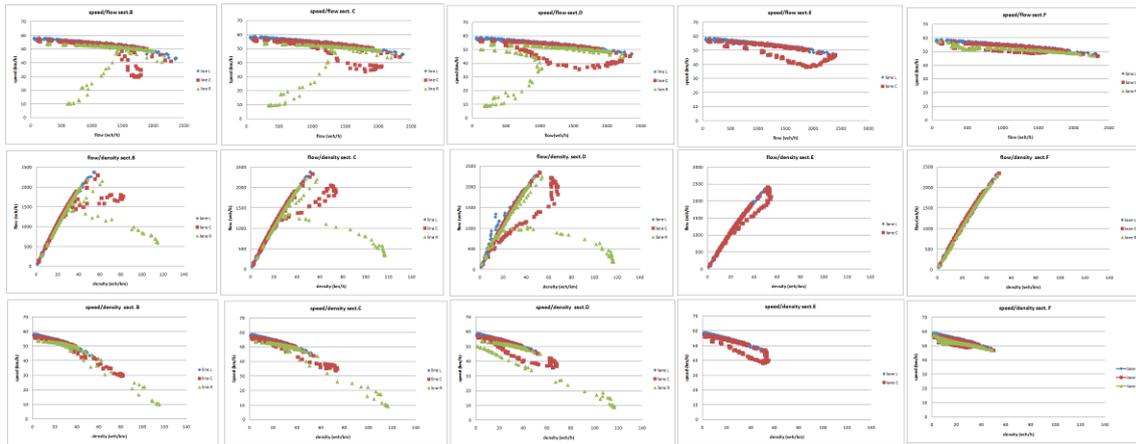


Fig. 12.3.- Relaciones flujo-velocidad; flujo-densidad y velocidad-densidad para una sección de tres carriles.

En la tabla 1 se presenta, a modo resumen, los resultados obtenidos, apreciando que un vehículo mal estacionado de solamente 15 minutos implica una reducción del 14 % del valor del flujo horario para viales de 2 carriles. Esto implica una sustancial modificación de la curva flujo-demora, ya que las demoras aumentan exponencialmente respecto de la situación sin suceso, en consonancia con la afirmación hecha por (McShane, 1990). De hecho, con flujos del 50% de la capacidad del arco, en el caso del vehículo estacionado durante 15 minutos, se producen aumentos del 57% en los tiempos medios de viaje, y del 107% cuando el suceso tiene una duración de 30 minutos.

La reducción de flujo y el aumento de tiempos medios de viaje son mayores lógicamente a medida que el suceso se presenta durante más tiempo, obteniéndose curvas de saturación-demora con tendencia asintótica al valor de la nueva capacidad registrada, llegando a una reducción del 53% de la capacidad cuando el suceso ocurre durante la hora completa. Esta reducción es menor que la considerada en otros estudios debido a lo ya expuesto anteriormente del menor efecto del “rubbernecking” ante un suceso de estas características.

En lo que respecta a viales de tres carriles, se obtienen reducciones de capacidad del 8% y 19% para sucesos de 15 y 30 minutos respectivamente, llegando hasta el 37% para sucesos de una hora de duración.



Tabla 12.1.- Flujo y demoras para diferentes sucesos obtenidos de la microsimulación.

2 carriles		Sin suceso			15'			30'			60'		
Demanda (veh/h)	Flujo	f/C	Demora (seg)	Flujo	f/C	Demora (seg)	Flujo	f/C	Demora (seg)	Flujo	f/C	Demora (seg)	
500	500	0.106	0.00	500	0.106	0.00	510	0.109	0.00	487	0.104	0	
1000	993	0.211	0.05	993	0.211	0.25	999	0.213	0.50	1015	0.216	1.17	
1500	1497	0.319	0.29	1497	0.319	0.75	1515	0.322	1.83	1503	0.320	3.75	
1750	1765	0.376	0.55	1765	0.376	1.75	1753	0.373	3.50	1745	0.371	6.92	
2000	2007	0.427	0.92	2007	0.427	3.08	2002	0.426	7.25	2004	0.426	15.33	
2250	2252	0.479	1.45	2252	0.479	6.33	2238	0.476	14.25	2250	0.479	32.42	
2500	2496	0.531	2.19	2496	0.531	11.75	2473	0.526	25.42	2259	0.481	50.42	
2750	2765	0.588	3.30	2765	0.588	15.64	2601	0.553	30.02	2261	0.481	54.67	
3000	2982	0.634	4.46	2982	0.634	22.12	2733	0.581	34.98				
3250	3288	0.700	6.63	3288	0.700	29.78	2862	0.609	40.12				
3500	3508	0.746	8.55	3508	0.746	37.96	2973	0.633	45.77				
3750	3779	0.804	11.53	3779	0.804	48.23	3095	0.659	54.00				
4000	4004	0.852	14.54	4021	0.856	65.15	3250	0.691	64.65				
4250	4238	0.902	18.27										
4500	4477	0.953	22.77										
4750	4692	0.998	27.38										

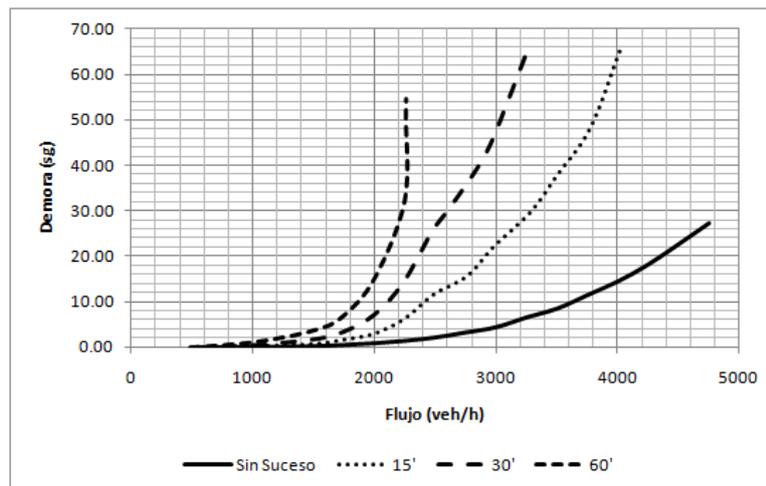


Fig. 12.4.- Diagrama simulado de flujo-demora para sucesos.

12.4. MANIOBRAS DE APARCAMIENTO.

En esta ocasión, se introducen las maniobras de aparcamiento como incidentes de corta duración y con una frecuencia elevada. Según los datos recogidos, el tiempo medio de estacionamiento introducido (d) es de 30 seg, y las frecuencias (f), las ya indicadas de 10, 20 y 30 maniobras/hora. Para ello se han medido más de 240 maniobras en varios viales de la ciudad de Santander, obteniendo los tiempos de duración de los sucesos y su distribución horaria.

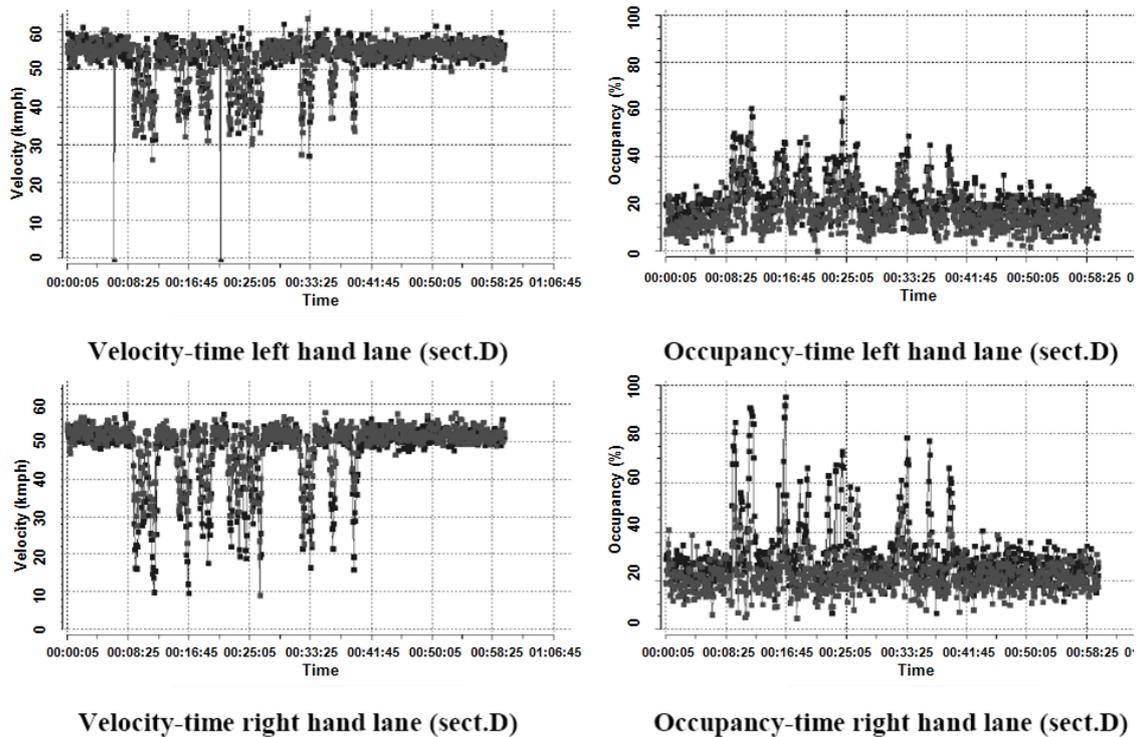


Fig. 12.5.- Velocidad y ocupación para una sección de dos carriles durante la hora de simulación.

De la misma forma que anteriormente se indicó, se ha variado en esta ocasión el número de estacionamientos, siendo los casos estudiados de 10, 20 y 30 maniobras/hora. De cada uno de los casos se han realizado 200 replicaciones.

Ante una maniobra de aparcamiento, el carril sufre un corte temporal en ese punto. En función de la intensidad del tráfico en el carril adyacente, los vehículos intentarán cambiar de carril para evitar el obstáculo. Hasta que eso sucede, la velocidad disminuye, llegando hasta la detención completa si éste no ha sido posible. Para ciertas intensidades de tráfico, el cambio de carril implica una reducción de la velocidad de los vehículos del

carril libre. Este comportamiento queda reflejado en la figura 6, donde se representan las variaciones temporales de las velocidades y ocupaciones de los carriles para dos intensidades de tráfico diferentes.

Los resultados y la comparación del modelo de colas con las microsimulaciones se muestran en la tabla 2. En ella se puede observar que se obtienen reducciones de la capacidad del 6%, 10% y 16% para 10, 20 y 30 maniobras respectivamente. Los tiempos medios de viaje, por su parte, aumentan un 15%, 24% y 39%, con lo que se demuestra la gran influencia que tiene sobre el tráfico el hecho de permitir estacionamientos en viales arteriales o de alta capacidad de las ciudades.

En lo que respecta a viales de tres carriles, se obtienen reducciones de capacidad del 4%, 7% y 12% para 10, 20 y 30 maniobras respectivamente.

Tabla 12.2.- Tiempo de viaje para diferente número de maniobras de estacionamiento.

		Nº de maniobras											
		0			10			20			30		
Flujo (veh/h)	Flujo	f/C	TT (seg)	Flujo	f/C	TT (seg)	Flujo	f/C	TT (seg)	Flujo	f/C	TT (seg)	
500	500	0.106	27.60	486	0.103	28.00	500	0.106	27.92	485	0.103	28.00	
1000	993	0.211	27.60	1018	0.217	28.00	993	0.211	28.00	1017	0.216	28.17	
1500	1497	0.319	27.85	1505	0.320	28.67	1497	0.319	28.58	1504	0.320	28.92	
1750	1765	0.376	27.90	1748	0.372	28.83	1765	0.376	28.92	1752	0.373	29.17	
2000	2007	0.427	27.95	2022	0.430	28.93	2023	0.430	29.67	2020	0.430	29.65	
2250	2252	0.479	28.00	2236	0.476	29.42	2230	0.474	29.92	2235	0.476	30.42	
2500	2496	0.531	28.05	2515	0.535	29.83	2496	0.531	30.21	2514	0.535	31.50	
2750	2765	0.588	28.10	2744	0.584	30.42	2745	0.584	31.42	2743	0.584	32.33	
3000	2982	0.634	28.20	2996	0.637	31.08	3006	0.640	32.75	2977	0.633	34.33	
3250	3288	0.700	28.35	3245	0.690	31.50	3273	0.696	33.67	3270	0.696	36.42	
3500	3508	0.746	28.50	3517	0.748	32.25	3525	0.750	35.33	3486	0.742	38.50	
3750	3779	0.804	29.05	3768	0.802	33.33	3795	0.807	37.17	3722	0.792	40.67	
4000	4004	0.852	30.18	4063	0.864	34.67	4030	0.857	38.33	3886	0.827	42.08	
4250	4238	0.902	30.85	4224	0.899	35.75	4195	0.893	39.25	3930	0.836	42.58	
4500	4477	0.953	31.60	4403	0.937	37.00	4241	0.902	39.50	3980	0.847	42.67	
4750	4692	0.998	32.85	4414	0.939	37.00	4248	0.904					

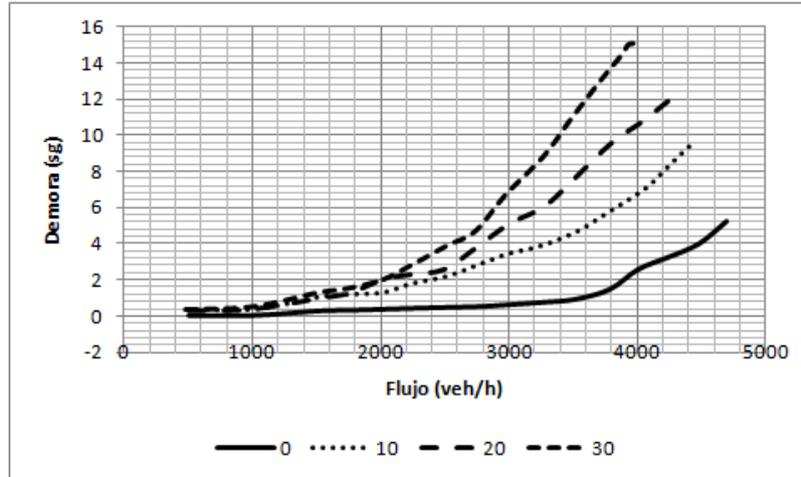


Fig. 12.6.- Diagrama simulado de flujo-demora para maniobras de estacionamiento.

12.5. CONCLUSIONES PARCIALES.

Los tiempos de viaje obtenidos de las microsimulaciones presentan aumentos para el resto de los usuarios del arco del 57% y 107% para vehículos mal estacionados durante 15 y 30 minutos respectivamente, con unas reducciones de capacidad de la vía del 13% y 27%. La reducción de capacidad obtenida de dicha vía cuando la duración del suceso es de 60 minutos llega al 55%, la cuál es menor que las obtenidas en otros estudios citados en la literatura internacional cuando se tratan temas referidos a incidentes, debido a que se minimiza el efecto del “rubbernecking”.

En lo que respecta a viales de tres carriles, se obtienen reducciones de capacidad del 8% y 19% para sucesos de 15 y 30 minutos respectivamente, llegando hasta el 37% para sucesos de una hora de duración.

En cuanto a la influencia de las maniobras de aparcamiento, de las microsimulaciones se obtienen reducciones de la capacidad de la vía del 6%, 10% y 16% para 10, 20 y 30 maniobras respectivamente, con aumento del tiempo medio de viaje para el resto de los usuarios, de un 15%, 24% y 39% respectivamente, demostrando así la influencia que tiene el hecho de permitir estacionamientos en viales arteriales o de alta capacidad de las ciudades en el resto del tráfico. En lo que respecta a viales de tres carriles, se obtienen reducciones de capacidad del 4%, 7% y 12% para 10, 20 y 30 maniobras respectivamente.

Capítulo 13

***MODELO DE OPERACIÓN DE BUSES EN PARADAS
CONGESTIONADAS***



CAPÍTULO 13. MODELO DE OPERACIÓN DE BUSES EN PARADAS CONGESTIONADAS.

13.1. INTRODUCCIÓN: EL ROL DE LAS PARADAS DE BUS EN LA OPERACIÓN DEL TRANSPORTE PÚBLICO.

Tradicionalmente se ha tomado el tiempo de viaje en vehículo como una de las principales variables a la hora de cuantificar el nivel de servicio del transporte público (EBTU, 1982). Así, el tiempo de viaje en vehículo (T_t) para una línea de transporte público puede ser descompuesto como la suma de los tiempos empleados en el movimiento del vehículo (T_a), tiempos de demora en intersecciones (T_i) y tiempos de detención en las paradas (T_{bs}):

$$T_t = T_a + T_i + T_{bs} \quad (13.1)$$

El tiempo total empleado en el movimiento del vehículo depende de la línea longitud del recorrido (L) y de la correspondiente velocidad de recorrido (V) en el tramo. El tiempo en total de demora en intersecciones será función del número de estas (N_i) y su demora media (d_i). Finalmente, el tiempo total en paradas de bus también será función del número (N_{bs}) y duración media de cada parada (d_{bs}). Con esto, la ecuación (5.1) puede reescribirse como (Fernández, 2001a, 2001b, 2003):

$$T_t = L/V + N_i \cdot d_i + N_{bs} \cdot d_{bs} \quad (13.2)$$



Suponiendo fijas la longitud de la ruta L y el número de intersecciones en el trayecto N_i , las posibilidades de disminución del tiempo de viaje se reducen a la actuación sobre la velocidad, las intersecciones y las paradas de bus.

Simplificando el análisis, si la demanda de pasajeros es baja, los buses no necesitarán parar en todas las paradas, por lo que los tiempos empleados en estas son muy reducidos. Además, puede darse la circunstancia que la accesibilidad o la cobertura a las paradas sea mala. En ambos casos N_{bs} será bajo, con lo que para mejorar el tiempo de viaje se puede aumentar la velocidad del bus V (segregándolo del resto del tráfico con un carril bus, por ejemplo) y reduciendo la demora en las intersecciones d_i (con sistemas de prioridad al transporte público).

Sin embargo, cuando la accesibilidad y la demanda aumentan, el número de paradas N_{bs} y su tiempo de detención d_{bs} aumentan considerablemente, así como incluso el tamaño de la flota necesaria. El tiempo de detención d_{bs} puede ser descompuesto en dos factores principales: tiempo de transferencia de viajeros (d_p) y congestión en el área de parada debido a la presencia de más buses (d_c): $d_{bs} = d_p + d_c$. Si la demanda o el flujo de buses son moderados, la probabilidad de congestión en la parada es baja, con lo que el último término puede ser despreciable. Por lo tanto, se podría disminuir d_p mejorando la eficiencia del sistema de pago o validación del billete (validación previa, tarjeta sin contacto, validadores en todas las puertas, etc.).

Si el flujo de bus y la demanda aumentan, d_c aumenta también, añadiendo demoras extra y colas de buses en las paradas que resultan un porcentaje muy elevado del tiempo total de viaje T_t . En este caso, el diseño físico y operacional de la parada es un factor clave a la hora de reducir d_p y d_c y conseguir por lo tanto mejorar la calidad del servicio y su fiabilidad (al ser d_{bs} menos variable, los horarios de paso pueden ser predichos mejor).

Por lo tanto, en este análisis realizado se pueden clasificar los paquetes de medidas en:

- Medidas adoptadas para la prioridad en arcos para reducir el tiempo de viaje en movimiento.
- Medidas para priorización en intersecciones para reducir las demoras en las mismas.



- Medidas para mejorar la operación en las paradas y reducir los tiempos de detención.

13.2. OPERACIÓN DE UNA PARADA DE BUS.

Si se considera una parada de bus con una sola área de parada, de tal forma que si un bus está ocupando el área, ningún bus más puede entrar y se tiene en cuenta el tiempo requerido por cada bus en el área de parada se puede establecer la capacidad de una parada como el número de buses que pueden utilizar el área de parada en un intervalo de tiempo (Gibson et al., 1989).

Cuando un bus llega a una parada se pueden definir varias etapas (Tyler, 2002):

- (1) Parada vacía esperando a la llegada de un bus.
- (2) Aproximación del bus.
- (3) Deceleración
- (4) Detención en el área de parada.
- (5) Apertura de puertas y carga y descarga de viajeros.
- (6) Cierre de puertas.
- (7) Durante el transcurso de cualquiera de esas etapas, otros buses pueden llegar después formando una cola detrás del primer bus, esperando a que llegue a la fase de despeje del área de parada para poder entrar a la misma.
- (8) Aceptación de gap para incorporarse al tráfico.
- (9) Aceleración y despeje del área de parada.
- (10) El segundo bus entra en el área de parada.

Por lo tanto, existe una demora en la parada debida al tiempo de carga y descarga de viajeros, pero también existe una demora adicional consistente en la suma del tiempo perdido en la cola, tiempos de aceleración y deceleración, tiempo de aceptación de gap

para incorporarse al flujo de tráfico y tiempo transcurrido entre la salida del bus precedente y la llegada del siguiente.

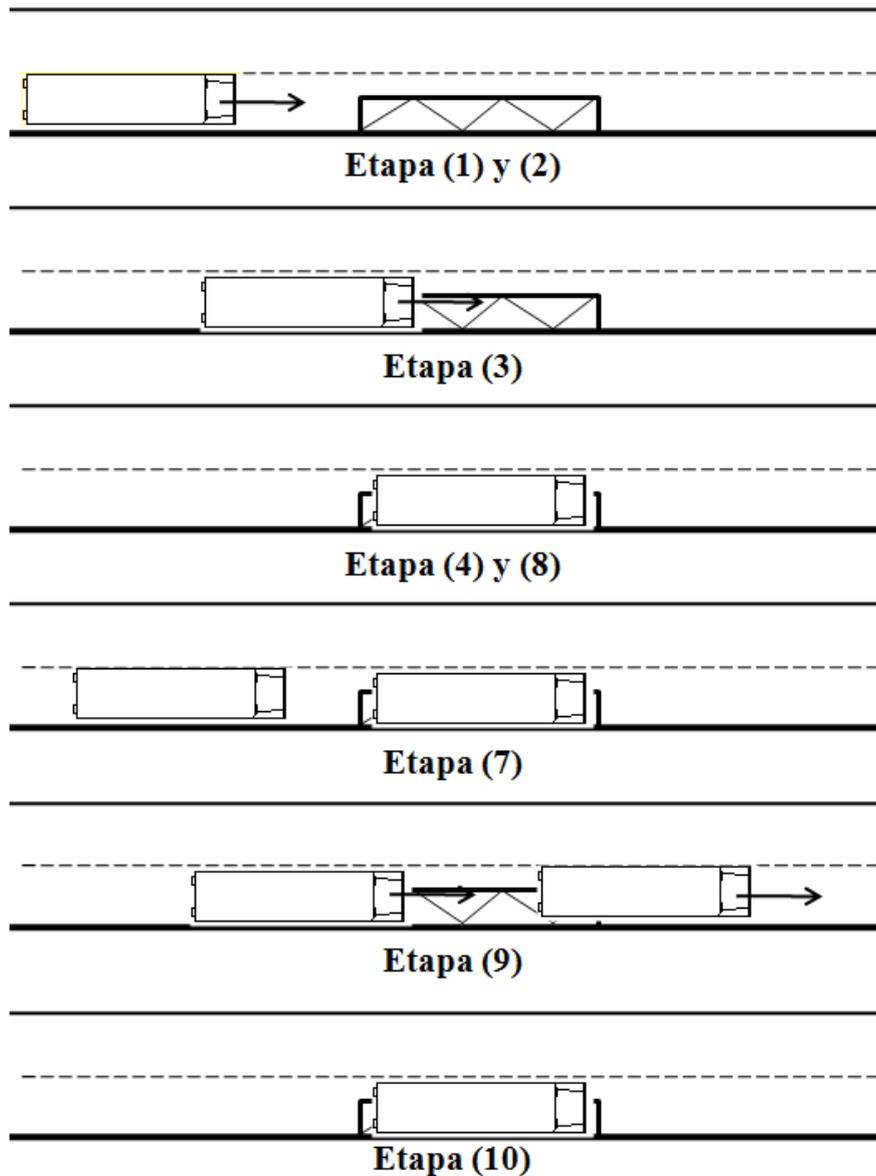


Fig. 13.1.- Etapas en la operación en una parada de bus

Estos tiempos de demora adicional son realmente significativos (Fernández y Tyler, 2005) por lo que su optimización mejora indudablemente la velocidad comercial de los buses y, aunque muchos de ellos son constantes, el más importante es sin duda el tiempo perdido en cola, el cual depende indudablemente de la distribución de llegadas de los buses a las paradas.



Obviamente, al aumentar la demanda y el flujo de buses, la capacidad de una parada como la aquí descrita se vuelve insuficiente, debiendo adoptar diversas soluciones para aumentar dicha capacidad. La opción más intuitiva es la de dos o más áreas de parada linealmente dispuestas, sin embargo, mientras que el primer área resulta totalmente eficiente, el resto va disminuyendo su capacidad llegando a reducciones del 95% para la situada en quinto lugar (TRB, 2000).

Lo anterior lleva al concepto de paradas divididas (Gibson y Fernández, 1995), en la cual una estación se divide en otras más pequeñas y eficientes para atender a la demanda de pasajeros y buses aumentando así la capacidad (Figura 1). Según esto, la capacidad de una estación dividida será del 100% en la de aguas abajo y del 93% en las anteriores a ella siguiendo los criterios de diseño que los autores recomiendan. Fernández (2001a) y Fernández y Tyler (1999) también analizan este fenómeno y exponen unos criterios de diseño y ubicación de ambas paradas:

- Un carril de adelantamiento que permita a los buses que no realizan la parada en el mismo punto adelantar a los de la parada de aguas abajo para mantener la independencia de las operaciones.
- Un espacio mínimo de 3 buses entre los puntos de parada para favorecer las maniobras de trenzado.
- Una pequeña separación entre dársenas de una misma parada que permita al segundo bus salir en caso de que el primero continúe detenido.

Fernández et al., (2007) demostraron que para flujos de buses elevados la capacidad de la parada situada aguas arriba se ve afectada por el flujo de buses que deben parar en la parada de aguas abajo, con lo que la capacidad se reduce con respecto a los trabajos anteriores.

Tradicionalmente, los buses han sido asignados a estas paradas divididas de acuerdo a sus rutas o destinos comunes, sin embargo, en un sistema de transporte público no siempre es posible hacer esta agrupación de una manera eficiente. Es en este aspecto donde uno de los modelos que se proponen en esta tesis (capítulo siguiente) resulta de gran ayuda, puesto que, solventado el criterio operacional de capacidad de las paradas,

permite distribuir las líneas de transporte público a las paradas divididas minimizando el coste social del sistema.

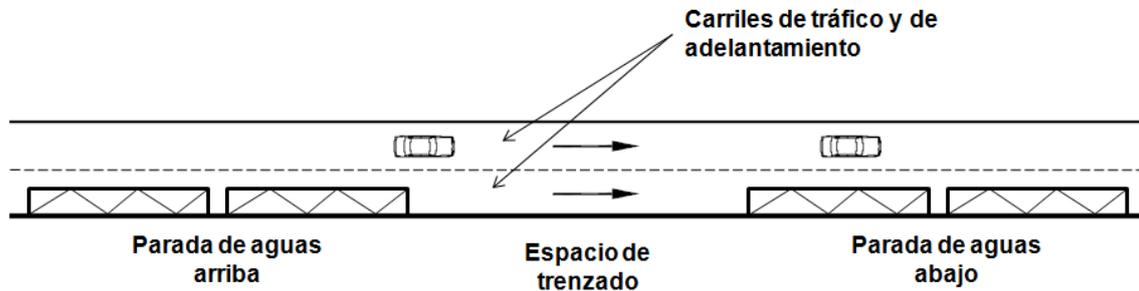


Fig. 13.2.- Parada de bus dividida

13.3. CAPACIDAD DE UNA PARADA DE BUS.

Como las paradas de bus se ubican en la calzada, su capacidad puede relacionarse con otros dispositivos viales, como las intersecciones (Fernández, 2001a). Dado que la función principal de los vehículos en una intersección es cruzar por ella, la capacidad de un acceso o carril de una intersección es el máximo número de vehículos que pueden entrar a la intersección por unidad de tiempo. Esta capacidad es el inverso del intervalo medio entre vehículos cuando hay una cola tratando de entrar a la intersección. Es decir:

$$Q_i = \frac{3600}{h} \quad (13.3.)$$

Donde :

Q_i : capacidad del acceso i (veh/h)

h : intervalo medio entre vehículos de la cola (sg.)

De igual modo, la capacidad de una parada se puede definir como “el máximo número de buses por unidad de tiempo que pueden entrar al área de parada” (Gibson et al, 1989). Sin embargo, esta capacidad no está sólo ligada al intervalo medio entre buses, ya que en ocasiones hay una cola tratando de entrar a la parada, sino que, además, será función de:



- Número de dársenas o sitios disponibles para realizar la transferencia de viajeros: teóricamente, cuantos más sitios disponibles, mayor número de buses podrán servir en la parada.
- Diseño de éstas dársenas o sitios de transferencia: en serie en paralelo, etc.
- Control del tráfico: se ha demostrado que la presencia de semáforos puede reducir notablemente la capacidad. En la revisión bibliográfica ya se han expuesto varios estudios sobre ello.
- Demanda: el número de pasajeros que suben/bajan en cada bus es un aspecto crítico en el cálculo de la capacidad.

Al igual que en otras estaciones terminales, la función principal de los buses en una parada es detenerse para transferir pasajeros, en lugar de sólo cruzar por el área de parada. Luego, el máximo número de buses que pueden entrar a la parada estará relacionado con el tiempo durante el cual el área de parada está ocupada por buses transfiriendo pasajeros. Es decir:

$$Q_B = \frac{3600}{t_o} \quad (13.4)$$

Donde :

Q_B : capacidad de una parada (bus/h)

t_o : tiempo de ocupación del área de parada (s)

El tiempo de ocupación del área de parada depende de los siguientes factores :

- t_l : tiempo de frenado y aceleración en la parada (sg.) ;
- t_p : tiempo detenido transfiriendo pasajeros (sg.) ;
- t_e : esperas internas por bloqueo de la salida (sg.) ;
- n/s : tiempo necesario para recorrer la parada (sg.) ;
- n : número de sitios de la parada;



· s : flujo de saturación del carril de la parada (bus/s).

Si el área de parada está compuesta por un solo sitio, pero no libre de obstrucciones, entonces (Fernández, 2001a) :

$$t_o = t_l + t_p + t_e + \frac{l}{s} = t_c + t_p + t_e \quad (13.5)$$

Donde :

$t_c = t_l + l/s$: tiempo de despeje del sitio (sg.)

Si el área de parada tiene varios sitios contiguos y linealmente dispuestos, la capacidad puede estimarse imaginando que la parada opera con un proceso cíclico de bloqueo y desbloqueo de su entrada, al igual que una intersección semaforizada. Así, la capacidad puede expresarse como (Gibson et al, 1989):

$$Q_B = \frac{3600 \cdot n}{T} \quad (13.6)$$

Donde :

n : número medio de buses que puede entrar a la parada en un período de desbloqueo

T : tiempo de ciclo entre estados similares de la parada (sg.)

Los estados sucesivos de la parada son dos :

- entrada bloqueada durante un período t_b ;
- entrada libre durante un período t_d .

Luego, el tiempo de ciclo se descompone de la siguiente manera:

$$T = t_b + t_d \quad (13.7)$$

Donde :

$t_b = t_l + t_p + t^e$: tiempo de bloqueo del sitio que impide la entrada (sg.)



$t_d = n/s$: tiempo de “llenado” de la parada (sg.)

En el caso de sitios linealmente dispuestos y disciplina FIFO (First In, First Out), el sitio que impide la entrada es el último.

Combinando las Ec.(5.6.) y (5.7.) la capacidad, en buses por hora, de una parada de sitios múltiples se puede expresar como :

$$Q_B = \frac{3600 \cdot n}{t_b + \frac{n}{s}} \quad (13.8.)$$

En la Ec.(5.8.), el número de vehículos n que puede entrar a la parada es tanto función de características físicas, como el número m de sitios, como operacionales, es decir, la forma de usar estos sitios ; en general, $n \leq m$. Asimismo, las componentes de t_b se pueden relacionar con variables físicas y de operación.

El tiempo t_l de aceleración y frenado estará condicionado por el tipo de buses que sirven a la parada y su forma de conducción. Así:

$$t_l = \frac{1}{2} \left(\frac{V_r}{a} + \frac{V_r}{f} \right) = \frac{V_r}{\gamma} \quad (13.9.)$$

Donde :

V_r : velocidad media de recorrido de los buses (m/sg.)

a : tasa media de aceleración de los buses (m/sg²)

f : tasa media de frenado de los buses (m/sg²)

g : media armónica de las tasas de aceleración y frenado (m/sg²)

El tiempo t_p para transferir pasajeros depende de cantidad de pasajeros que suben y bajan de cada bus en la parada. Esto se puede expresar como:

$$t_p = \begin{cases} \beta_0 + (\beta_1 p_s + \beta_2 p_b) \dots\dots\dots, subidas / bajadas _ sucesivas \\ \beta_0 + \max \{ \beta_1 p_s ; \beta_2 p_b \} \dots\dots\dots, subidas / bajadas _ simultáneas \end{cases} \quad (13.10)$$



Donde :

β_0 : tiempo muerto por detención: abrir/cerrar puertas (sg.)

β_1 : tiempo marginal de subida por pasajero (sg/pax)

β_2 : tiempo marginal de bajada por pasajero (sg/pax)

p_s : número de pasajeros que sube al bus (pax)

p_b : número de pasajeros que baja del bus (pax)

Las esperas internas t_e se deben a fenómenos de congestión dentro del área de parada. Tal como en otros terminales, es el período durante el cual un bus no puede acceder o abandonar un sitio debido a restricciones impuestas por los otros vehículos o por condiciones del tráfico. En el caso de una parada con sitios linealmente dispuestos y disciplina FIFO, corresponderá al tiempo t_b del sitio aguas abajo.

La interdependencia entre las componentes t_b y n en paradas de sitios múltiples forma un complejo sistema de interacción entre pasajeros y buses al interior de la parada, lo que hace difícil calcular el valor de la capacidad con expresiones analíticas, excepto para condiciones muy particulares. Por ejemplo, sitio único, llegadas de pasajeros y buses a intervalos constantes, ausencia de congestión interna, etc.

Para cubrir un espectro más amplio de configuraciones físicas y condiciones de operación, se han desarrollado modelos de simulación para su cálculo. Entre éstos se pueden mencionar IRENE (Gibson et al, 1989) y PASSION (Fernández, 2007) ya mencionados en la revisión del estado del arte. Algunos valores de capacidad son mostrados en la Tabla 1.

Se ha observado que un funcionamiento apropiado de una parada se obtiene para grados de saturación menores a 0,65 (Gibson y Fernández, 1995). Los valores de capacidad de la Tabla 1 corresponden a un grado de saturación igual a 0,6. Este será el grado de saturación práctico de paradas (notar la diferencia con el valor 0,9 en semáforos). En tales circunstancias, la longitud media de cola a la entrada de la parada será de 0,5 buses, o sea, como máximo 1 bus el 50% del tiempo, y la demora media resultará de aproximadamente 60 segundos por bus.



Tabla 13.1.- Capacidades prácticas de paradas de bus. (Gibson y Fernandez, 1995)

Tipo de Operación	Orden ¹				Desorden ²
Tasa Subida (pax/bus)	12	8	4	2	8
Tasa Bajada (pax/bus)	6	4	2	1	4
Número de Sitios	CAPACIDAD PRÁCTICA ³ (bus/h)				
2	60	80	100	130	70
3	80	105	125	160	80

1 Disciplina FIFO, buses paran una vez en el sitio más próximo a la salida.

2 Adelantamiento permitido (AP), detenciones múltiples y en cualquier sitio.

3 Estimada para un grado de saturación 0,6.

En resumen, las capacidades necesarias para que paradas simples operen eficientemente están entre 60 y 160 buses por hora. Además, la influencia de intersecciones semaforizadas cercanas puede producir reducciones de hasta un 40% en la capacidad (Gibson y Fernández, 1995). Como regla práctica muy general, se puede considerar un valor de 30-60 bus/h/sitio, dependiendo principalmente de la tasa de subida de pasajeros por bus y de la disciplina de uso de los sitios.

También existen expresiones analíticas de capacidad de paradas de buses. Entre las más difundidas se encuentran las del Highway Capacity Manual, HCM (TRB, 2000), posteriormente desarrolladas en el Manual de Capacidad y Calidad de Servicio de Transporte Público (TRB, 2003).

Modelo del Transit Capacity and Quality of Service Manual (TCQS, 2003).

El TCQS establece la siguiente fórmula para estimar la capacidad de una parada de sitios múltiples en la calzada:

$$Q_N = N_{eb} \frac{3600 \cdot \left(\frac{g}{C}\right)}{t_c + \left(\max(X_n \cdot t_s, Y_n \cdot t_b) + t_{o,c}\right) \cdot \left(\left(\frac{g}{C}\right) + Z_a \cdot c_v\right)} \cdot f_m \quad (13.11)$$

Donde:



Q_N : capacidad de una parada de N sitios (bus/h)

N_{eb} : sitios o dársenas efectivas por parada.

g/C : razón de verde efectivo del semáforo de influencia en la parada (si lo hubiera).

t_c : tiempo de despeje entre dos buses consecutivos (sg.)

Z_a : factor que establece con qué frecuencia un bus se encuentra al llegar la parada ocupada.

X_n : demanda media de pasajeros que toman el bus en la parada n (pax)

Y_n : demanda media de pasajeros que se bajan del bus en la parada n (pax).

t_s : tasa de subida (sg/pax).

t_b : tasa de bajada (sg/pax).

c_v = coeficiente de variación del tiempo de ocupación.

f_m : factor de penalización para condiciones de tráfico mixto.

En la Ec.(5.11.), si no hay semáforo aguas abajo, entonces $(g/C) = 1,0$. Las tasas de subida al bus dependen del número de puertas, número de validadores, tipología de sistema de pago y la ocupación del propio bus. La tasa de bajada depende casi exclusivamente del número de puertas de salida disponibles. En ambos casos el TCQS 2003 trata además el impacto de sillas de ruedas, bicis, coches de bebé, etc. en los tiempos de subida y bajada.

Las figuras 5.3 y 5.4 muestran las variaciones de capacidad de una parada de bus ante diversos valores del tiempo de operación en la parada y proporciones de verde.

El TCQS también sugiere diferentes valores de N_{eb} para configuraciones lineales de sitios sin posibilidades de adelantamiento entre los buses (Tabla 2). En esta tabla se puede apreciar que la eficiencia de cada dársena va disminuyendo exponencialmente.

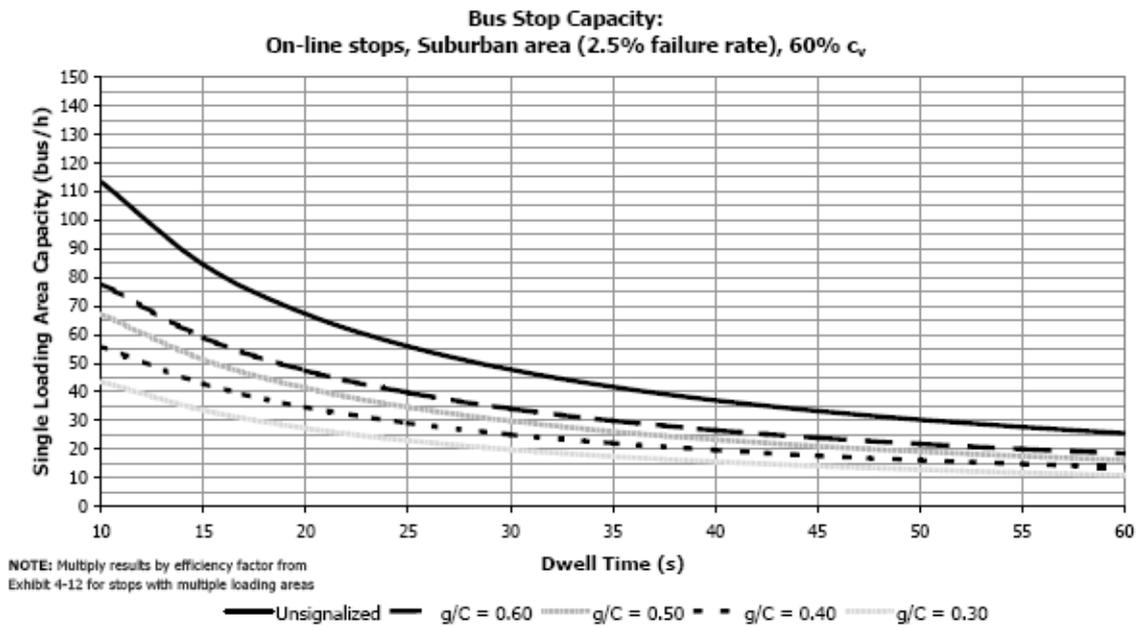


Fig. 13.3.- Capacidad de una parada de bus en áreas suburbanas en función de la operación del semáforo y tiempo de parada (TCQS, 2003)

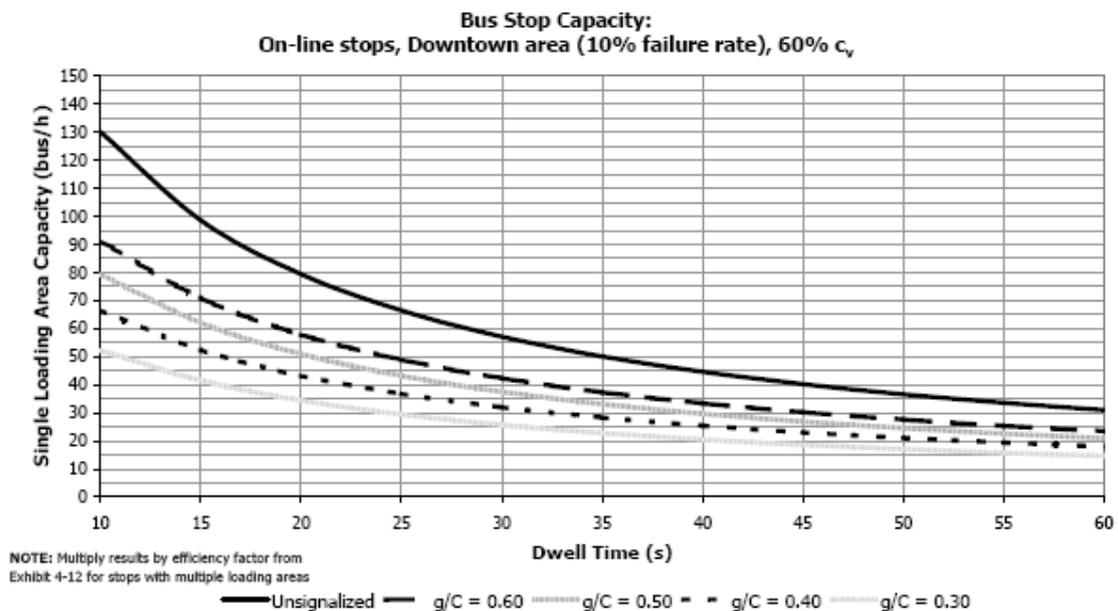


Fig. 13.4.- Capacidad de una parada de bus en áreas urbanas en función de la operación del semáforo y tiempo de parada (TCQS, 2003).

En cuanto a la influencia del control de tráfico, en la tabla 3 se adjunta una estimación de capacidad de paradas de bus en función de la proporción de verde de un semáforo aguas debajo de una parada.

Tabla 13.2.- Eficiencia según el número de sitios en una parada (TCQS, 2003).

Loading Area #	On-Line Loading Areas				Off-Line Loading Areas	
	Random Arrivals		Platooned Arrivals		All Arrivals	
	Efficiency %	Cumulative # of Effective Loading Areas	Efficiency %	Cumulative # of Effective Loading Areas	Efficiency %	Cumulative # of Effective Loading Areas
1	100	1.00	100	1.00	100	1.00
2	75	1.75	85	1.85	85	1.85
3	70	2.45	80	2.65	80	2.65
4	20	2.65	25	2.90	65	3.25
5	10	2.75	10	3.00	50	3.75

Tabla 13.3.- Capacidad de una parada según el número de sitios, operación del semáforo y tiempo de parada del bus (TCQS, 2003).

Dwell Time (s)	Number of On-Line Linear Loading Areas									
	1		2		3		4		5	
	<i>g/C</i> 0.50	<i>g/C</i> 1.00	<i>g/C</i> 0.50	<i>g/C</i> 1.00	<i>g/C</i> 0.50	<i>g/C</i> 1.00	<i>g/C</i> 0.50	<i>g/C</i> 1.00	<i>g/C</i> 0.50	<i>g/C</i> 1.00
30	48	69	84	120	118	169	128	182	133	189
60	27	38	48	66	68	93	74	101	76	104
90	19	26	34	46	48	64	52	69	54	72
120	15	20	26	35	37	49	40	53	41	55

En lo que se refiere a las paradas de bus divididas, Fernandez et al., (2007) demostraron que para flujos de buses elevados la capacidad de la parada situada aguas arriba se ve afectada por el flujo de buses que deben parar en la parada de aguas abajo. Así, la capacidad de una parada doble (Q_E) puede definirse como la suma de las paradas de aguas arriba (Q_U) y aguas abajo (Q_D):

$$Q_E = Q_U + Q_D$$

$$Q_U = \begin{cases} 154 - 0.95 \cdot q_d & \text{para 3 sitios} \\ 119 - 1.29 \cdot q_d & \text{para 2 sitios} \end{cases} \quad (13.12)$$

donde q_d es el flujo de buses que paran en la parada de aguas abajo.

13.4. MODELO PROPUESTO DE OPERACIÓN DE BUSES EN PARADAS CONGESTIONADAS.

Del análisis realizado se llega a la conclusión de que la eficiencia de operación de una parada está relacionada principalmente con la capacidad de ésta, y esta capacidad depende a su vez de los tiempos de sube/baja, y de las esperas adicionales debidas a la formación de colas de buses.

Es evidente que para un usuario de transporte público, el tiempo que el bus en el que está viajando está detenido debido a esperas a otro bus que está operando en una parada supone un tiempo extra en su tiempo percibido de viaje (Larraín y Muñoz, 2007).

Asimismo, para el operador también resulta pernicioso este fenómeno en cuanto a que disminuye su velocidad comercial y provoca una mala percepción del servicio por parte del usuario.

Para poder modelizar las llegadas de los buses a las paradas y la posible formación de colas se asume que la llegada de los buses a la parada se ajusta a una determinada distribución (Cowan, 1975; Danas, 1980; Law and Kelton, 1991). Por lo tanto, la probabilidad de que dos buses consecutivos lleguen a una misma parada en un intervalo (headway) menor que t viene dada por la expresión:

$$\Pr(h < t) = 1 - \Pr(h \geq t) \quad (13.13)$$

Para modelizar la demora de un vehículo de la línea l en la parada de bus n ($TBS_{l,n}$) se parte de la expresión (7.7), que estaba relacionada con el tiempo de operación de cada línea l en cada parada n debidos al sube/baja de pasajeros. A la hora de considerar los tiempos de espera en cola de los buses se debe incluir la probabilidad de que al llegar un bus a la parada, esta ya esté ocupada con otro bus.

Por lo tanto, si se denomina el tiempo de operación de cada bus de la línea l en la parada n ($OT_{l,n}$) al tiempo obtenido por la expresión (7.7)

$$OT_{l,n} = \left[\max(Y_{l,n} \cdot t_s; X_{l,n} \cdot t_b) / f_l + (t_{o,c} / 60) \right] \quad (13.14)$$

donde:

t_s = tiempo promedio de subida de los pasajeros (h).

t_b = tiempo promedio de bajada de los pasajeros (h).

$Y_{l,n}$ = demanda de viajes de la línea l y origen en la parada n que se obtiene por simulación (pax/h).

$X_{l,n}$ = demanda de viajes de la línea l y destino la parada n que se obtiene por simulación (pax/h).

$t_{o,c}$ = tiempo promedio perdido de apertura y cierre de puertas y en las maniobras de entrada y salida del área de parada por cada bus (aceleración y frenado) (min).

Se puede obtener el tiempo de operación medio de todas la líneas L que paran en la parada n ($OT_{L,n}$) como:

$$OT_{L,n} = (1/L) \sum_l \left[\max(Y_{l,n} \cdot t_s; X_{l,n} \cdot t_b) / f_l + (t_{o,c} / 60) \right] \quad (13.15)$$

Cuando un bus de la línea l llega a la parada n y esta ya está ocupada, el tiempo nuevo de detención ($TBS_{l,n}$) será su propio tiempo de operación más la espera en cola, que dependerá de los tiempos de operación de los buses que están en la parada o que le preceden en la cola. Por ello, el tiempo total puede expresarse como:

$$TBS_{l,n} = OT_{l,n} + \left(OT_{L,n} \cdot \phi \cdot (\zeta_n)^\vartheta \right) \quad (13.16)$$

donde ζ_n es la probabilidad de llegada de buses consecutivos, o probabilidad de que la parada n esté ocupada $\rightarrow \Pr(h < t)$ y ϕ y ϑ son parámetros de calibración que simulan la presencia de más de dos buses en la cola o bien la llegada de un bus cuando otro ya está en mitad de su operación o finalizando la misma.

Por otra parte, esto afectará también al coste de los buses en ralentí (CR) de los costes del operador, que, recordando la ecuación (7.5) se expresaban como:

$$CR = \sum_k \left(\sum_l \sum_n TBS_{l,n} \cdot f_l + \sum_l Tc_l \right) \cdot Cr_k \cdot \delta_{l,k}$$

Donde ahora TBS tendrá la forma definida en (13.16) y Tc_l vendrá de la expresión (11.1).

Para la calibración del modelo se han obtenido los datos del SAE del sistema de transporte urbano de la ciudad de Santander (TUS) para ajustar las llegadas de buses a las paradas principales de la ciudad, realizando mediciones de su tiempo de detención para cada línea. En concreto, se han analizado los datos de todos los días laborables del mes de Febrero de 2009, ajustando la distribución de intervalos a una exponencial negativa, validado mediante el test Chi cuadrado. En la figura 13.5 se representan las distribuciones de intervalos entre buses en la parada del Ayuntamiento para el día medio laborable de 8 a 17 horas. Asimismo, se realizaron mediciones de tiempos de subida y bajada de los pasajeros, así como tiempos perdidos en maniobra, apertura y cierre y en cola.

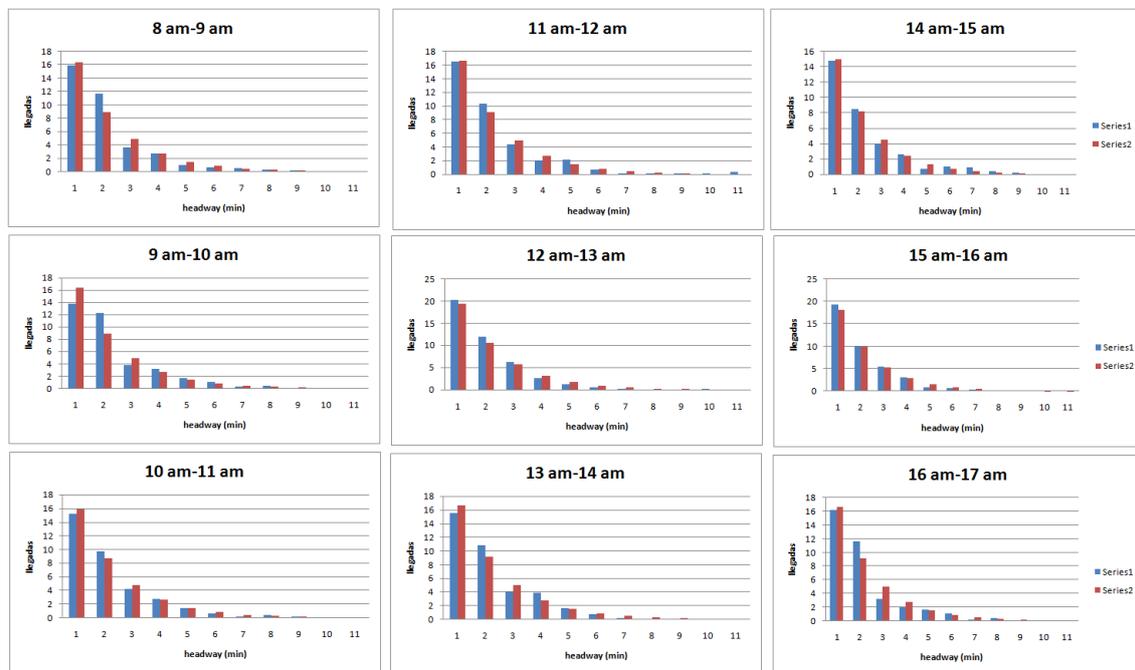


Fig. 13.5.- Distribución de llegadas de buses. Parada Ayuntamiento.

Por lo tanto, la expresión (13.13) viene dada por:

$$\zeta_n = \Pr(h < t) = 1 - e^{-\lambda t} \tag{13.14}$$

Con los datos registrados en campo se creó un escenario de microsimulación para la parada de bus del Ayuntamiento (figura 13.6) en el que, para los tiempos de operación de cada línea, se iban variando los buses/hora que operaban en la parada, midiendo los tiempos totales de detención del bus en la parada (TBS).



Fig. 13.6.- Microsimulación de la parada del Ayuntamiento.

Si se representan los tiempos medios de operación en parada de todas las líneas en función de la probabilidad de llegada de buses consecutivos para todas las simulaciones realizadas, se obtiene a relación mostrada en la figura 13.7. En esta misma figura (dcha.) se observa el ajuste realizado para obtener los parámetros ϕ y ϑ , se muestra en la figura 13.7:

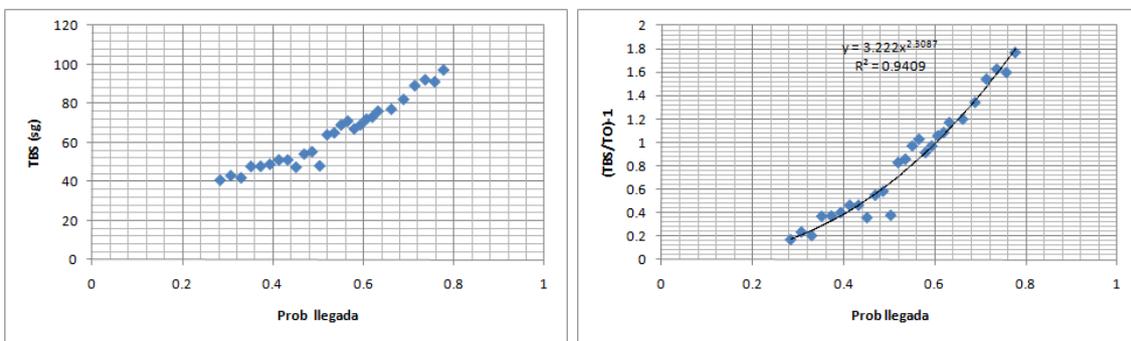


Fig. 13.7.- Ajuste de la microsimulación.

Con estos parámetros ya calibrados, se comparan las mediciones realizadas con la simulada mediante la expresión (13.16), obteniendo un buen ajuste, tal y como se muestra en la figura 13.8.

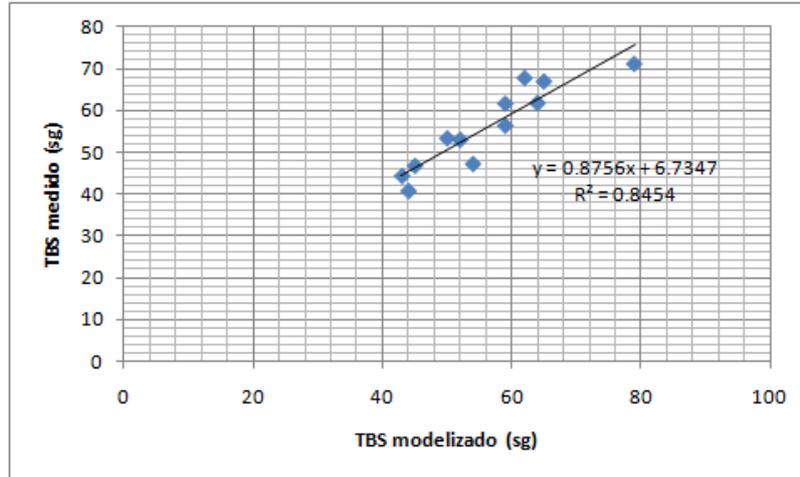


Fig. 13.8.- Ajuste con la medición en campo.

Capítulo 14

***MODELO DE ASIGNACIÓN DE LÍNEAS DE TRANSPORTE
PÚBLICO A PARADAS DE BUS DIVIDIDAS***



CAPÍTULO 14. MODELO DE ASIGNACIÓN DE LÍNEAS DE TRANSPORTE PÚBLICO A PARADAS DE BUS DIVIDIDAS.

14.1. INTRODUCCIÓN.

En el capítulo 13 ya se exponía que una solución comúnmente adoptada es la ubicación de dos o más dársenas, generalmente linealmente dispuestas, para facilitar las operaciones de varios buses simultáneamente, de tal forma que los tiempos de espera de los buses en cola se reduzcan.

Sin embargo, bien por una demanda y flujo de buses elevados, bien por características físicas del lugar donde se ubica la parada, esta solución no siempre es factible, por lo que surge el concepto de parada dividida (figura 13.2), ya expuesto en el capítulo 13.

Una vez que se adopta la decisión de dividir una parada de bus para mejorar la operatividad y aumentar su capacidad, el siguiente paso es decidir qué líneas deben parar en cada parada.

Tradicionalmente, las líneas han sido asignadas a estas paradas divididas de acuerdo a sus rutas o destinos comunes, sin embargo, en un sistema de transporte público no siempre es posible hacer esta agrupación de una manera eficiente.

En el momento en el que se dividen las líneas de transporte público, una proporción de usuarios están siendo perjudicados en cuanto a que es posible que estén viendo reducidas su conjunto de líneas comunes para ir a un determinado destino. Esto implica



indudablemente, al menos a priori, una disminución de la frecuencia efectiva de la sección de ruta y, por lo tanto, mayores tiempos de espera.

Además, suponiendo que una parte de los usuarios deban realizar transbordos para alcanzar sus destinos, el hecho de dividir las líneas a la parada de aguas arriba o aguas abajo producirá un tiempo e incomodidad extra de transbordo de desplazarse de una parada a otra.

Por otro lado, la mejora en la operatividad en la parada se traduce en una menor congestión en la misma que incide en un menor tiempo de operación, con lo que los viajeros que están en ya en el bus perciben positivamente la disminución de estos tiempos perdidos.

Es por ello que se propone un modelo que busca aquella asignación de buses a paradas que minimice exclusivamente el coste del usuario (UC) de transporte público. Es conocido que el operador va a resultar también beneficiado en cuanto a que se mejora la velocidad comercial, sin embargo, la distribución de líneas debe hacerse pensando en la comodidad y beneficio del usuario, de tal manera que si una distribución de líneas empeora el coste del usuario pero mejora el coste del operador no se considere.

14.2. EL MODELO PROPUESTO.

Para la resolución del problema de asignación de líneas a las paradas de bus divididas se plantea un Modelo matemático de Optimización Bi-nivel, compuesto de un nivel superior que minimiza una función de costes del usuario de transporte público, ya expuesto en el apartado 7.2 y un nivel inferior en el que se incluye el modelo de asignación al transporte público expuesto en el capítulo 7 teniendo en cuenta la influencia del tráfico privado y la congestión en los vehículos de transporte público.

Además se considera una demanda fija y conocida de viajes, definida por las respectivas matrices de viajes O/D para cada modo de transporte.

Recordando la expresión (6.2), los costes de los usuarios se dividen en cuatro componentes, asociados a los tiempos de acceso, espera, viaje en vehículo y transbordo. De todos ellos, los tiempos de espera, viaje y transbordo serán función de la distribución

de líneas de bus a paradas, mientras que el tiempo de acceso se considera constante en cuanto a que las diferentes áreas de parada están cercanas entre ellas.

Los tiempos de espera, viaje y transbordo vendrán dados por un modelo de asignación al transporte público (De Cea y Fernández, 1993, ver apartado 7.3.3) en el que debe tenerse en cuenta cómo las diferentes distribuciones de líneas a paradas modifican los tiempos en las paradas de bus, y estos a su vez influyen en los tiempos de viaje en el bus.

La función de optimización del nivel inferior se modela como ya se ha dicho a través de un modelo de asignación de equilibrio al transporte público considerando la restricción de capacidad de los buses (De Cea y Fernández, 1993) que puede formularse mediante una desigualdad variacional del siguiente tipo:

$$\bar{C}(\bar{V}^*) \cdot (\bar{V} - \bar{V}^*) \leq 0, \quad \forall \bar{V} \in \Omega \quad (11.6)$$

donde \bar{V} es cualquier vector factible de flujos en secciones de ruta $\{V_s\}$, \bar{V}^* representa la solución de equilibrio en términos de flujos en secciones de ruta, Ω es el conjunto de vectores factibles de flujos en secciones de ruta y \bar{C} es el vector de costes en secciones de ruta c_s definida ya en la ecuación (7.3) como:

$$c_s = \bar{t}_s + \left(\frac{\lambda}{f_s} \right) + \zeta \cdot \varphi_s \left(\frac{V_s + \tilde{V}_s}{K_s} \right) \quad (11.7)$$

donde V'_s es el flujo en otros arcos de viaje, que contienen alguna línea de las que pertenecen a la sección s y que compiten con la capacidad de la sección s , K_s es la capacidad de la sección s , f_s es la frecuencia de la sección de ruta s y \bar{t}_s es el tiempo de viaje definido a continuación.

Recordando la ecuación (10.1) una vez que un pasajero aborda un vehículo en la parada, el tiempo de viaje sobre dicho vehículo (t_l) de la ecuación estará determinado por: los tiempos de viaje en el arco (T_v), demoras debidas a señales de tráfico (T_c) que encuentre a su paso y la duración de las detenciones a realizar en las paradas (TBS) (Larraín y Muñoz, 2008) donde se incluirá el efecto de congestión en las mismas.

Los tiempos de viaje en el arco pueden ajustarse mediante curvas flujo-demora (BPR o similar). Las demoras experimentadas debidas a señales de tráfico pueden obtenerse mediante la expresión ya expuesta en la ecuación (11.1) y, finalmente, las demoras en paradas han sido ya modelizadas en el capítulo 13 mediante la ecuación (13.16).

Teniendo todo esto en cuenta, para un determinado viaje en una línea l entre dos paradas, el tiempo de viaje en bus será:

$$t_l = \sum_{\kappa} T v_{\kappa} + \sum_c T c_c + \sum_n T B S_n \Rightarrow \sum_{\kappa} \left(t_0 \cdot \left(1 + \alpha \cdot \left(\frac{v_{\kappa}}{k_{\kappa}} \right)^{\beta} \right) \right) + \sum_c ((\delta_{lc} + l_{lc})) + \sum_n \left(OT_n + (OT_{L,n} \cdot \phi \cdot (\zeta_n)^{\theta}) \right) \quad (14.1)$$

Suponiendo además que la línea en cuestión pertenece a una sección de ruta s , el tiempo de viaje de la sección de ruta \bar{t}_s vendrá dado por:

$$\bar{t}_s = \frac{\sum_{l \in s} t_l \cdot f_l}{\sum_{l \in s} f_l} \quad (14.2)$$

Como se ha dicho, se considera que el sistema tiene capacidad limitada y, por lo tanto, a medida que aumenta el número de usuarios en el sistema, aumentan sus tiempos de viaje. Se asume que el fenómeno de congestión está presente en las paradas, dado que los viajeros experimentan tiempos de espera que dependen de la capacidad total del conjunto de líneas y del número de pasajeros que desean usar esas líneas para realizar sus viajes, así como del número de pasajeros que suben y bajan en cada parada.

Por lo tanto, los costes de los arcos de transporte público no dependen de su propio flujo y son asimétricas, con lo que el Jacobiano de las funciones de coste es en general no diagonal y asimétrico (De Cea et al., 2003) con lo que no existe un problema de optimización equivalente. Un método usualmente utilizado para poder resolver este problema es el algoritmo de diagonalización (Florian, 1977), en el que dada una solución inicial factible, los costes de los arcos son diagonalizados permitiendo funciones de coste separables, con lo que ahora la solución de este problema es igual a la solución de la transformada de Beckman (Beckman et al., 1956), con lo que se puede formular un problema de optimización equivalente como:

$$\min \sum_{s \in S} \int_0^{V_s} \hat{c}_s(x_s) dx_s \quad (14.3)$$

s.a.:

$$T_w = \sum_{r \in P_w^m} h_p, \quad \forall w \quad (14.4)$$

$$V_s = \sum_{p,w} h_p \cdot \beta_{sp}, \quad \forall s$$

$$h_p, V_s \geq 0, \quad \forall p, s$$

Donde \hat{c}_s es la función de costes diagonalizada y dependiente de su propio flujo (De Cea y Fernandez, 1993), T_w es la demanda del par O-D w , h_p es el flujo en la ruta p , V_s es el flujo en la sección de ruta s y β_{sp} es un elemento que toma valor 1 si la sección de ruta s pertenece a p y 0 en caso contrario.

El conjunto de restricciones (14.4) serán las respectivas de continuidad y no negatividad de flujos y las restricciones de repartición de flujos en arcos de transporte público a secciones de línea.

Además, la frecuencia f_s puede variar a f_s' , siendo $f_s \geq f_s'$, en cuanto a que el usuario puede no subirse al primer bus de una línea atractiva que pase puesto que éste puede estar a capacidad. Es aquí donde entra el concepto de frecuencia efectiva, como la frecuencia real percibida por el viajero debido a la congestión en los vehículos de transporte público (De Cea y Fernandez, 1993).

En base a la estructura de costes y tiempos descrita queda definido el problema de optimización propuesto:

Nivel Superior:

$$\min \phi_w TWT + \phi_v TIVT + \phi_T TTT \quad (14.5)$$

s.a.:

$$\sum_l f_l \cdot \delta_{l,m} \leq N_{eb} \frac{3600 \cdot \left(\frac{g}{C}\right)}{t_c + \left(\max(X_n \cdot t_s, Y_n \cdot t_b) + t_{o,c}\right) \cdot \left(\left(\frac{g}{C}\right) + Z_a \cdot c_v\right)}, \quad \forall m \quad (14.6)$$

$$\sum_l f_l \cdot \delta_{l,m} \geq \sum_l \frac{Y_l \cdot \delta_{l,m}}{K_l}, \forall l \in L \quad (14.7)$$

$$\zeta_l^m = \zeta_l^m \quad (14.8)$$

Nivel Inferior:

$$\min \sum_{s \in S} \int_0^{V_s} \hat{c}_s(x_s) dx_s \quad (14.9)$$

s.a.:

$$\begin{aligned} T_w &= \sum_{r \in P_w^m} h_p, \forall w \\ V_s^m &= \sum_{p,w} h_p \cdot \beta_{sp}, \forall s \\ h_p, V_s &\geq 0, \forall p, s \end{aligned} \quad (14.10)$$

donde:

N_{eb} = dársenas efectivas por parada.

c_s = el vector de costes en secciones de ruta s .

g/C = razón de verde efectivo del semáforo de influencia en la parada (si lo hubiera).

t_c = tiempo de despeje entre dos buses consecutivos.

Z_a = factor correspondiente a la probabilidad de formación de colas de buses en una parada.

c_v = coeficiente de variación del tiempo de ocupación.

$\delta_{l,m}$ = variable binaria que toma valor 1 si la línea l para en la sub-parada m y 0 en caso contrario.

Las restricciones (14.6) y (14.7) garantizan que la solución satisfaga las restricciones de capacidad de las paradas, siendo ésta calculada según el TCQS Manual (TRB, 2003, ver capítulo 13), y la demanda respectivamente. Finalmente (14.8) cumple la restricción operacional de que dos o más líneas deban estar siempre juntas en la distribución.

14.3. MÉTODO DE SOLUCIÓN.

La metodología seguida para la resolución del problema planteado se basa en una heurística que encuentra la asignación óptima de líneas a paradas, de tal manera que el coste del usuario de transporte público sea mínimo.

Para la generación de soluciones factibles se ha diseñado un algoritmo genético. Estos algoritmos tienden a imitar el proceso genético de los organismos vivos tendiendo a la supervivencia de los especímenes mejor adaptados de una especie. En el caso de un problema matemático la especie es el distinto número de posibles soluciones que se engloban en el dominio de solución del problema propuesto y la mejor adaptación vendrá dado por las características específicas del problema planteado, en este caso, los mejor adaptados serán aquellas soluciones que minimicen el valor de la función objetivo.

Los principios básicos de los Algoritmos Genéticos fueron establecidos por Holland (1975), y se encuentran bien descritos en varios textos Goldberg y Richardson (1987), Davis (1991), Michalewicz (1992), Reeves (1993). En esta investigación se hace uso del Algoritmo Genético Simple o Canónico (AGS), el cuál consta de los componentes básicos de estos algoritmos *Generación, Selección, Cruce, y Mutación*.

Esquemáticamente, el algoritmo heurístico utilizado puede ser descrito en las siguientes etapas:

Etapas 1: En la etapa inicial se proporciona una asignación inicial factible de líneas a paradas, que conforma el vector $[d^n]$. Con esta asignación, se resuelve el problema de optimización del nivel inferior.

Etapas 2: Con los datos de tiempos de viaje, espera y transbordo de la asignación de la Etapa 1 se calcula el valor de la función de costes del nivel superior C^n .

Etapas 3: El algoritmo genético AGS realiza una mutación del vector $[d^n] \rightarrow [d^{n+1}]$, volviéndose a las Etapas 1 y 2. A continuación se muestra el pseudocódigo del AGS usado.

BEGIN

Generación: se genera la población inicial.



Computo de la función objetivo que se desea minimizar

WHILE terminado \neq TRUE

FOR tamaño de población/2

BEGIN

Selección: seleccionar dos individuos de la población

Para el cruce (dicha selección se hace proporcional a

La función de evaluación del individuo).

Cruce: se cruzan con cierta probabilidad los dos

Individuos obteniendo dos descendientes.

Mutación: se mutan los dos descendientes con cierta

Probabilidad.

Se computa el valor de la función objetivo de los

Descendientes

Estos dos descendientes pasan a formar parte de la nueva

Generación.

END

IF población a convergido THEN

Terminado = TRUE.

END

END

Etapa 4: Una vez alcanzado el número de iteraciones totales del algoritmo genético, se obtiene el vector $[d^n]$ cuyo C^n sea mínimo.

Para la resolución del problema de optimización del nivel inferior (modelo de asignación de equilibrio de transporte público) se ha empleado el software ESTRAUS[®] (De Cea et al., 2003) mientras que para el cálculo de la función de coste del nivel superior y la ejecución del algoritmo de resolución se ha utilizado una aplicación en MATLAB[®] (www.mathworks.com).

14.4. EJEMPLO DE APLICACIÓN.

Para comprobar la validez del modelo propuesto se ha aplicado a la red ejemplo del capítulo 9. En la figura 14.1 se representan las líneas de transporte público, ya descritas en la tabla 9.2. En dicha red puede verse que todas las líneas de transporte convergen en un corredor central común, de 1.6 km de longitud, conformado por las paradas 4-5-6-7-8-9-10-11-12, que, según los resultados del modelo macroscópico, están separadas cada 200 metros.

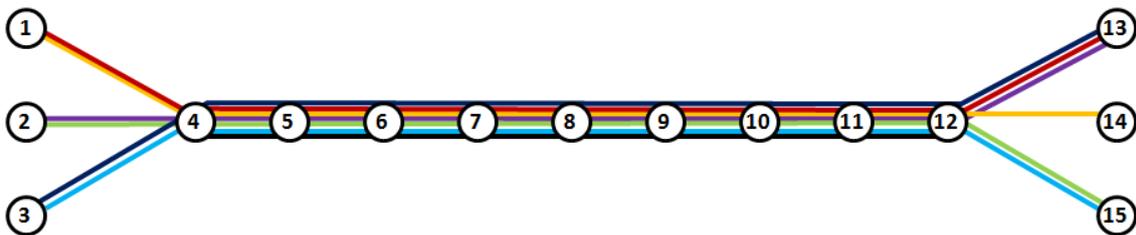


Fig. 14.1.- Líneas de transporte público de la red ejemplo.

La matriz de viajes en bus se asume fija y conocida, resultado también del ejemplo anterior, y se muestra en la tabla 14.1, por otra parte, el sistema de transporte público carece de infraestructura segregada, es decir, comparte red vial con el auto. Asimismo, la llegada de los buses a las paradas se asume poissoniana, con lo que se ajusta a una distribución exponencial negativa, así, la expresión (13.13) será:

$$\zeta_n = \Pr(h < t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (14.11)$$

Atendiendo a las características de cada línea, se puede calcular que 63.5 buses/hora deben ser servidos por las paradas 4 a 12. Según el TCQS (TRB, 2003) dependiendo de las condiciones de control, del tráfico y la demanda este valor puede exceder notablemente de la capacidad de una parada simple. En concreto, asumiendo que el tráfico en el tramo 4-12 es de 900 veh/h, no existe vía segregada para el transporte público, existe una regulación semafórica con un ciclo de 90 sg. con 0.6 de proporción de verde, y tomando como dwell time en base a la demanda de pasajeros 44 sg, dwell time variation 0.6 y failure rate de diseño del 15% ($Z = 1.040$), la capacidad práctica de una parada sencilla es de 40 buses/h. En caso de no estar cerca de un semáforo, la capacidad práctica aumenta hasta los 46 buses/h. Ambos valores son claramente inferiores al número de buses que operan en el eje 4-12. Dentro de las alternativas

disponibles para aumentar la capacidad de una parada, se plantea su división en dos paradas (berths) en el mencionado tramo 4-12: paradas de aguas arriba y parada de aguas abajo, tal y como se muestra en la figura 3 de tal forma que se pueda dar servicio a la totalidad de los buses que operan en él. Por lo tanto, queda por averiguar cómo distribuir las líneas a cada parada de tal manera que se minimice el coste del usuario.

El hecho de dividir las paradas de bus implica que el subconjunto de líneas atractivas para un determinado par O-D puede modificarse, aumentando en algunos casos el tiempo de espera pero disminuyendo el tiempo de viaje en vehículo puesto que el tiempo perdido en cada parada es menor.

A la hora de aplicar el modelo, se han probado diferentes valores en las restricciones de capacidad de las paradas divididas, en función de su proximidad a un semáforo y de la influencia entre las propias paradas divididas (Cortés et al., 2007). Asimismo, los valores de los tiempos de viaje, espera, acceso y transbordo son los mismos a los usados en los ejemplos anteriores.

Tabla 14.1.- Matriz O/D de transporte público.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Σ
1	0	0	0	40	0	123	32	60	111	0	101	0	99	50	69	685
2	0	0	0	78	61	67	62	82	99	40	68	57	45	57	50	767
3	0	0	0	130	49	71	28	110	0	115	72	109	98	50	72	903
4	0	0	0	0	55	49	0	143	0	127	50	79	90	76	94	763
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	32	0	32
6	0	0	0	0	0	0	136	75	28	46	23	105	76	85	24	599
7	0	0	0	0	0	0	0	0	63	28	101	27	101	72	84	475
8	0	0	0	0	0	0	0	0	142	118	0	0	41	79	0	381
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	150	39	81	57	50	74	451
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	54	74	132	78	80	418
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	144	0	35	32	210
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	88	48	0	136
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Σ	0	0	0	248	165	310	258	471	444	626	507	676	827	711	578	5821

Tabla 14.2.- Valores de las variables usadas en la aplicación.

Variable	Valor
ϕ	3.2
ϑ	2.3



Fig. 14.2.- Esquema de división de una parada de bus en la red ejemplo.

14.5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

En primer lugar, se han comparado dos métodos de búsqueda para llevar a cabo la minimización del problema propuesto. En primer lugar se optó por un algoritmo de búsqueda exhaustiva el cual exploraba todas las posibilidades del espacio de solución y por otro lado se utilizó un algoritmo genético diseñado especialmente para la resolución del problema planteado, como ya se ha expuesto en el apartado 3.

En la figura 14.3 se muestran los resultados obtenidos por los dos algoritmos empleados. Se observa que ambos parten y llegan a valores idénticos, este resultado es un buen test para el algoritmo diseñado, no se debe olvidar que la búsqueda exhaustiva proporciona un mínimo absoluto del sistema y la coincidencia entre el mínimo proporcionado por ambos métodos no hace sino elevar la confiabilidad del algoritmo genético diseñado para la resolución del problema presentado en este artículo.

Resulta obvio, que dadas las características de la red empleada, el número de variables del problema presentado no explota suficientemente la rapidez computacional del algoritmo genético. Aún así, se puede ver que el número de iteraciones es un 20% menor con este último.

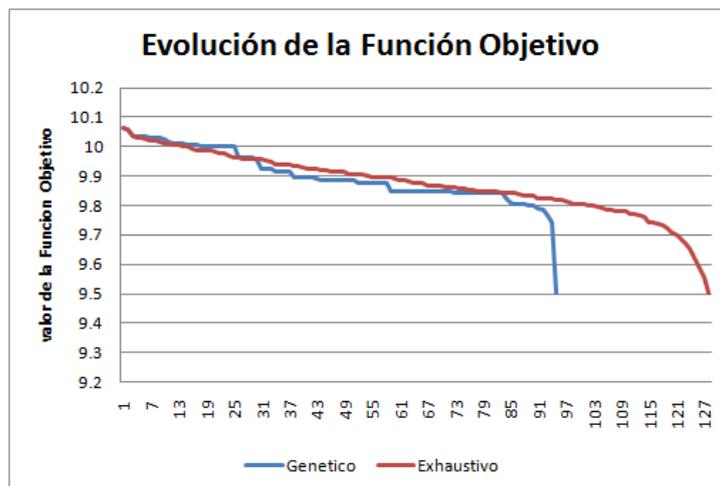


Fig. 14.3.- Evolución de la función objetivo respecto del número de iteraciones.



En lo que se refiere a los resultados del modelo, en la tabla 14.3 se muestran los resultados obtenidos para cada una de las alternativas analizadas. En esta tabla 14.3 se puede observar cómo en función de la restricción de la capacidad de cada parada, la distribución de líneas varía sensiblemente, tendiendo siempre a asignar más líneas a la parada de capacidad mayor, de tal manera que el número de buses/hora se aproxime a ésta. De hecho, en el caso de suponer paradas con capacidades elevadas implica el agrupamiento de la mayoría de las líneas en una misma parada, de tal manera que se minimice el tiempo de espera para las líneas atractivas. Sin embargo, existen unas pautas comunes en todos los resultados. Así, se puede apreciar que las líneas L1, L2 y L5 siempre aparecen en la misma parada. Estas líneas tienen como destino común el nodo 13, y este dato es relevante puesto que según la matriz O-D es este nodo el de mayor demanda de viajes. Lo mismo sucede con la L3 y la L6, cuyo destino final es el nodo 14. Además, el hecho de que se tienda a agrupar un mayor número de buses en la parada de capacidad mayor consigue aumentar la frecuencia efectiva en el tronco 4-6-7, que es una zona de fuerte demanda.

Tabla 14.3.- Soluciones finales.

Capacidad		Líneas		Buses/hora		Vel.	Coste
Parada U	Parada D	Parada U	Parada D	Parada	Parada	Comercial	Usuario
40	40	L1,L2,L5	L3,L4,L6,L7	23.5	40	11.82	9.58
35	35	L1,L2,L4,L5	L3,L6,L7	31	32.5	11.82	9.71
30	40	L1,L2,L5	L3,L4,L6,L7	23.5	40	11.82	9.58
25	40	L1,L2,L5	L3,L4,L6,L7	23.5	40	11.82	9.58

Un ejemplo de la importancia de una correcta distribución de líneas a paradas se representa en la tabla 14.4. En dicha tabla se puede apreciar como varias distribuciones distintas puede dar lugar a variaciones importantes de la velocidad comercial y del coste de usuario. Concretamente se han seleccionado la óptima y pésima dada por el modelo. Así, se aprecian incrementos de velocidades del 10% en el transporte público, lo que para el eje considerado supone un ahorro de dos minutos, o lo que es lo mismo, 2 minutos sobre 21 minutos de viaje total. Asimismo, el coste de usuario disminuye un 5% en la mayoría de las pruebas realizadas.

Tabla 14.4.- Comparativa entre distintas distribuciones de líneas a paradas de bus

Solución	Capacidad		Líneas		Buses/hora		Vel.	Coste
	Parada U	Parada D	Parada U	Parada D	Parada U	Parada D	Comercial (km/h)	Usuario (€/pax)
Óptima	40	40	L1, L2, L5	L3, L4, L6, L7	23.5	40	11.82	9.58
Pésima	40	40	L2, L4, L6,	L1, L3, L5	37.5	26	11.07	9.88
Óptima	35	35	L1, L2,	L3, L6, L7	31	32.5	11.82	9.71
Pésima	35	35	L4, L5, L7	L1, L2, L3, L6	28.5	35	10.98	9.95
Óptima	30	40	L1, L2, L5	L3,L4,L6,L7	23.5	40	11.82	9.58
Pésima	30	40	L1, L2, L4,	L3, L6, L7, L8	25	39	11.25	10.06
Óptima	25	40	L1, L2, L5	L3,L4,L6,L7	23.5	40	11.82	9.58
Pésima	25	40	L2, L3, L4	L1, L5, L6, L7	25	38.5	11.25	10.06

14.6. CONCLUSIONES PARCIALES.

En este capítulo se ha tratado la problemática de la congestión en las paradas de bus debidos a los vehículos de transporte público, exponiendo la duplicación de paradas como un método utilizado para ampliar la capacidad de las paradas. Para resolver la problemática de qué líneas deben parar en cada parada se ha propuesto una metodología de distribución de líneas de transporte público a paradas de bus divididas en el que se minimiza el coste del usuario teniendo en cuenta la interacción con el tráfico privado y la congestión en el sistema de transporte público. Para la generación de soluciones factibles se ha utilizado un algoritmo genético, contrastado con uno de búsqueda exhaustiva, que reduce el coste computacional y de tiempo de ejecución.

La distribución obtenida con el modelo propuesto sigue pautas coherentes con lo esperado, en cuanto a que agrupa las líneas de destinos comunes en una misma parada, dando preferencia a los destinos con mayor demanda.

Los resultados obtenidos muestran la importancia de una buena distribución de líneas a paradas en cuanto a que se pueden obtener diferencias del 10% en la velocidad comercial y del 5% en el coste social.

Capítulo 15

EJEMPLO DE APLICACIÓN

CAPÍTULO 15. EJEMPLO DE APLICACIÓN.

En este capítulo se incorporan los modelos en elementos de control, incidentes y paradas de bus congestionadas a la red ejemplo del capítulo 9. Siguiendo el ejemplo del capítulo 10 inicial, se ubican los semáforos en los mismos nodos y con la misma proporción de verde y se permiten los estacionamientos en los arcos marcados en rojo.

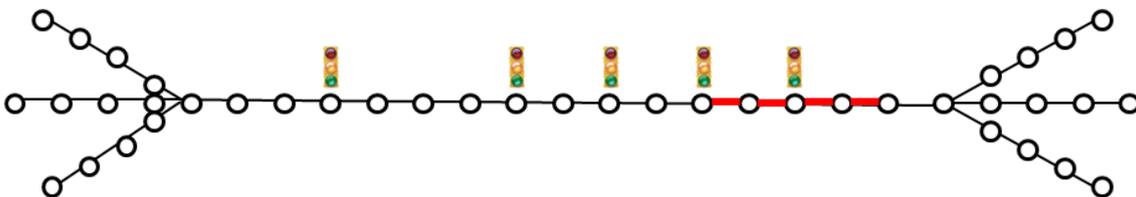


Fig. 15.1.- Red ejemplo considerando elementos semafóricos y maniobras de estacionamiento.

Por lo tanto, antes de iniciar el algoritmo se deberá introducir la demora en cada nodo semaforizado según la expresión (11.1). Seguidamente, asumiendo que en los arcos con estacionamientos se registran 20 maniobras a la hora, se reduce su capacidad en un 10%, según las conclusiones extraídas del capítulo 12. Como las líneas de transporte público tienen frecuencias fijas, se sabrá el número de buses/hora que pasan por cada parada. Asumiendo en esta etapa del problema que las paradas no presentan restricciones de capacidad, aunque sí interacciones entre los propios buses, los tiempos de parada de los buses se definen según la expresión (13.16).



Una vez introducidos los aspectos operacionales y las incidencias, se define un vector inicial $[d]:[d_1, d_2]$ en el que cada componente establezca el distanciamiento entre las paradas para esa zona. Por ejemplo, se va a empezar con el mismo vector $[200, 200]$ del ejemplo de la Parte III, siguiendo ya la misma metodología en el proceso de generación de nuevos vectores y parada del algoritmo.

Es evidente que en este ejemplo, la red es la misma pero los tiempos de viaje se ven ligeramente incrementados debidos a las penalizaciones por semáforos, estacionamientos y congestión de las paradas de bus. Esto significa que, indudablemente, los valores obtenidos de la función objetivo serán mayores a los del ejemplo anterior.

En la tabla 15.1 se muestran los resultados obtenidos de las iteraciones del algoritmo, utilizando la búsqueda Tabú, comparando sus resultados con los equivalentes del ejemplo de aplicación de la Parte III. Como puede verse, las iteraciones y el resultado final de espaciamento de paradas se mantienen, si bien existen sensibles variaciones en el valor del coste social obtenido en la Parte III (Z_0) y en el ejemplo actual (Nueva Z).

Este incremento de coste se debe por un lado a que, tal y como se avanzaba anteriormente, los tiempos de viaje son superiores a los de la situación actual pero, además, los costes del operador aumentan debido a que aumenta el tiempo de ciclo y, en ocasiones, esto puede dar lugar a un ligero aumento de flota. Así, se ha añadido a la tabla la comparativa entre la flota requerida en cada caso para cumplir las frecuencias donde se aprecian estas variaciones.

Tabla 15.1.- Iteraciones TS considerando operativa e incidencias en la red.

Iteración	Sub-iteración	Vector	Paradas	Z_0	Nueva Z	Flota ₀	Nueva Flota
	1	[200, 200]	21	5524	5691	26	30
1	2	[100, 200]	33	5801	6222	31	32
1	3	[300, 200]	20	5499	5609	26	29
1	4	[200, 300]	18	5542	5701	26	27
1	5	[200, 100]	29	5741	6098	31	32
2	6	[400, 200]	15	5340	5513	26	27
2	7	[300, 300]	17	5505	5623	26	26
2	8	[300, 100]	29	5722	5819	31	32
3	9	[500, 200]	14	5388	5555	25	26
3	10	[400, 100]	23	5619	5800	26	32
3	11	[400, 300]	12	5484	5593	25	26

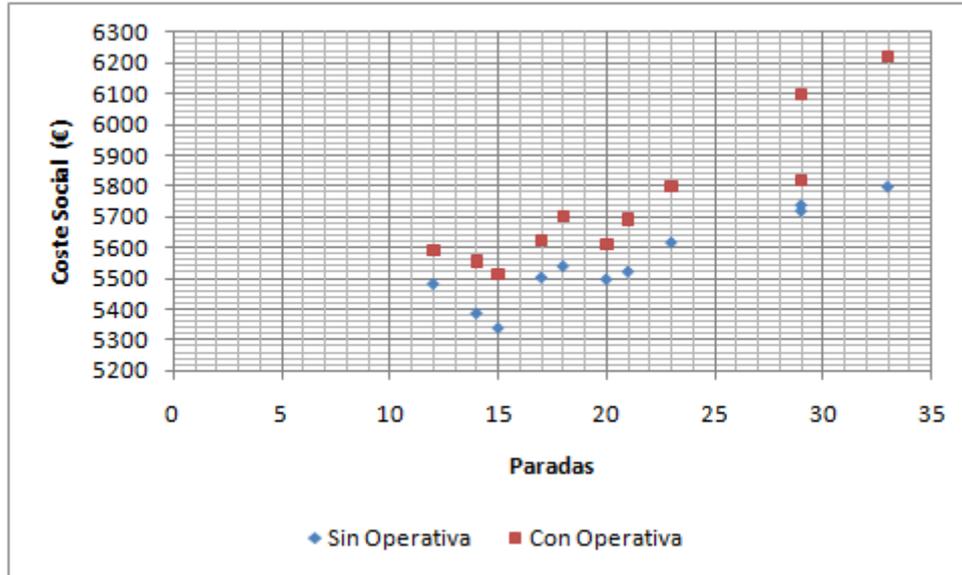


Fig. 15.2.- Coste social con y sin considerar la operativa e incidencias en la red

**PARTE V: PROPUESTA DE MODELO MICROSCÓPICO
DE UBICACIÓN DE PARADAS DE BUS EN EJES
URBANOS**

Capítulo 16

DESCRIPCIÓN DEL MODELO



CAPÍTULO 16. DESCRIPCIÓN DEL MODELO.

16.1. EL MODELO PROPUESTO.

En este capítulo se presenta un modelo microscópico para definir la ubicación final de paradas de bus a lo largo de un corredor.

Este modelo parte de la solución obtenida con el modelo a nivel macro de Espaciamiento y Ubicación de paradas de bus y de la asignación de líneas a paradas divididas presentados en las Partes III y IV de esta tesis. Por lo tanto, se parte de una solución inicial dada por estos modelos, en el que se hace una primera ubicación de paradas a nivel macro (nivel estratégico), para en este modelo (nivel táctico) afinar dicha ubicación en un eje concreto a nivel micro en el que ya se tienen en cuenta 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 por ello que se debe recurrir a las ventajas de los modelos de microsimulación en cuanto a nivel de detalle se refiere para reproducir este enfoque más operacional. Es este tipo de modelos se pueden representar todo lo que hasta ahora, debido a la escala de simulación, no se podía modelizar, o al menos no con tanta exactitud.

Desde el punto de vista de una buena planificación de un sistema de transporte resulta muy interesante conocer la interacción de éste sobre el total del tráfico dentro de una ciudad, especialmente en las zonas más congestionadas. En concreto, uno de los puntos más conflictivos de esta interacción son las paradas de bus ya que provocan maniobras



de trenzado entre buses y vehículos en las incorporaciones y salidas de la parada, y pueden constituir cuellos de botella al cortar temporalmente el carril de circulación en el caso que la parada no esté segregada.

Además, una correcta ubicación de las paradas del sistema de autobuses en un eje urbano puede ser ventajosa no solo para el sistema de transporte en sí, sino que también lo puede ser para el tráfico rodado en general.

Por lo tanto, se puede definir el modelo que aquí se propone como un refinamiento del proceso de macrosimulación, con el que se afina 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.

Una vez que el modelo de macroscópico planteado en la Parte IV encuentra el óptimo, éste 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, como ya se ha expuesto, 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 debido a las colas longitudinales, cambios de carril, incorporaciones desde las paradas al flujo de tráfico, coordinación semafórica, etc.). Es aquí donde entra en juego el modelo de microsimulación que a continuación se va a plantear.

La solución del modelo de macrosimulación se vuelca mediante GIS en el modelo de microsimulación. Así, para cada punto planteado, en función de su ubicación inicial, se proponen varias alternativas de posicionamiento de la parada, obteniéndose al final del proceso la localización óptima para dicha parada. 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.



16.2. SOBRE LOS MODELOS DE MICROSIMULACIÓN.

Los modelos de simulación microscópica surgieron como respuesta a la creciente demanda de soluciones a las limitaciones que se planteaban en los modelos macroscópicos.

Según el Manual de Capacidad Norteamericano (HCM; TRB, 2000), un modelo de simulación microscópica permite simular cada vehículo individualmente, pudiendo ser representados en la red vial, y con ello sus trayectorias espacio-tiempo. Estos modelos contienen procesos lógicos que permiten simular el comportamiento de los vehículos y su interacción con otros vehículos y con la red vial. Estos comportamientos incluyen lógicamente los procesos de aceleración, deceleración, adelantamientos, cambios de carril, movimientos de giro en intersecciones, aceptación de gap, etc. Todos ellos constituyen eventos que se van sucediendo y evolucionando a cada paso temporal de la simulación, por ejemplo de 0.1 segundos.

Asimismo, la red vial puede ser también representada a nivel de carriles, pudiéndose incluir redes semafóricas y demás elementos operacionales de la vía.

El hecho de poder simular escenarios a escala mucho más detallada, permite reproducir con mayor fidelidad los comportamientos de los vehículos ante determinadas situaciones.

Para ello, los modelos de simulación microscópica o de micro-simulación constan de varios sub-modelos a través de los cuáles se llega a lograr un realismo que, años atrás podía parecer impensable. Dentro de estos sub-modelos, se encuentran modelos de seguimiento vehicular (“car following”), cambios de carril (“lane-changing”), adelantamientos, formación y disipación de pelotones, elección de ruta, transporte público, etc.

La conjunción de todos ellos otorga una gran versatilidad a este tipo de modelos, además de permitir la representación de fenómenos que en los modelos a gran escala no podían ser simulados correctamente, tales como el “spillback” o “spill-over”, trezados en entradas y salidas en autopistas, accidentes, etc.



Además, el continuo desarrollo de los modelos de micro-simulación, junto con los avances de las tecnologías de la información, ha posibilitado la ampliación de los campos de actuación de éstos, abriéndose nuevas áreas de trabajo combinando los submodelos ya mencionados con otros más complejos de asignación. Un ejemplo de esto se puede encontrar en los modelos de asignación dinámica, información en tiempo real al viajero, etc. (Janson, 1991; Barceló y Casas, 2002).

La complejidad de todos estos modelos junto con la gran cantidad de datos a almacenar y tratar hacen que requieran mayor recurso computacional que los modelos de simulación tradicionales. También se diferencian de estos en su naturaleza eminentemente estocástica, frente al carácter determinista de la gran mayoría de modelos macroscópicos.

Por lo tanto, los modelos de micro-simulación constituyen una herramienta fundamental para la replicación de todo tipo de operaciones y gestión del tráfico (Fellendorf, 1994; Manstetten et al., 1998; Yang y Kotsopoulos, 1996), “ramp-metering” (Chu et al., 2004) aplicaciones de Sistemas de Transporte Inteligentes o ITS (Intelligent Transportation Systems) a nivel tanto de viajero, como de tráfico o transporte público (Abdulahi et al., 1999), análisis de seguridad vial, respuesta ante situaciones de emergencia, sistemas de priorización del transporte público, o análisis de emisiones y contaminantes, influencia de maniobras de estacionamiento en el tráfico, etc. (Liu et al., 2001; Ukpong et al., 2006).

A lo largo de estos años han sido desarrollados numerosos modelos de microsimulación, la mayoría convertidos posteriormente en software comercial. Así, el Masachusetts Institute of Technology (MIT) ha desarrollado el modelo MITSIMLab (Yang et al., 1999), la empresa española TSS comercializa AIMSUN NG (Barceló et al., 1994), siendo este la evolución del software GETRAM (Grau y Barceló., 1993). Otros modelos muy populares y de uso extendido son PARAMICS (Wylie et al., 1993) y VISSIM (Fellendorf, 1994), por poner solamente algunos ejemplos. En realidad muchos centros de investigación han desarrollado en mayor o menor medida un software propio de microsimulación, similar a estos ya mencionados, que pueden ser aplicados para casos más generales o desarrollados para usos específicos.



Una parte fundamental de los modelos de microsimulación es su calibración y validación. De hecho, en la literatura científica existen numerosas publicaciones en las que se proponen parámetros de control y metodologías de calibración de los submodelos que componen el modelo microscópico (Kleijnen, 1995; Balci, 1998; Barceló y Casas, 2004; Gardes et al., 2002; Ben-Akiva et al., 2002; Hourdakis et al., 2003).

Como ejemplo de todo ello se han elaborado parámetros de validación de flujos, se han propuesto expresiones para el número óptimo de corridas de simulaciones para un escenario, metodologías para medir los tiempos de reacción de un conductor y gap crítico para los modelos de seguimiento y cambio de carril, modelos de elección de ruta, etc.

Se puede afirmar por lo tanto que un modelo de microsimulación bien calibrado constituye una herramienta imprescindible para el análisis táctico y de gestión de todo tipo de sistemas de transporte.

16.3. PROCESO DE SIMULACIÓN Y ALMACENADO.

Una vez seleccionadas las diferentes posibles ubicaciones para cada parada se procederá a simular los diferentes escenarios que se generen combinando dichos posicionamientos. Para poder llevar a cabo el proceso de combinación, generación, simulación y almacenamiento de resultados de cada escenario se ha usado el simulador AIMSUN, sobre el cual se ha implementado una MACRO programada en lenguaje *Phyton* para realizar el proceso de forma automatizada. Esta MACRO se detalla en el Anexo III.

En el escenario de simulación se tendrán un número total de M paradas de las cuales, un subconjunto de ellas serán susceptibles de poseer varias posibles ubicaciones, mientras que las restantes, bien por motivos de la topología de la zona, bien por ser del tipo Mid-block sin semáforo, su ubicación ya es definitiva. Cada una de estas M paradas constituirá un elemento de un vector \overline{M} cuyo valor puede variar de 1 a p , siendo p el número total de ubicaciones posibles para esa parada. Asimismo, cada alternativa de parada tendrá una etiqueta asociada de 1 a p .

El proceso seguido para la simulación y almacenamiento de datos se puede describir en las siguientes etapas:

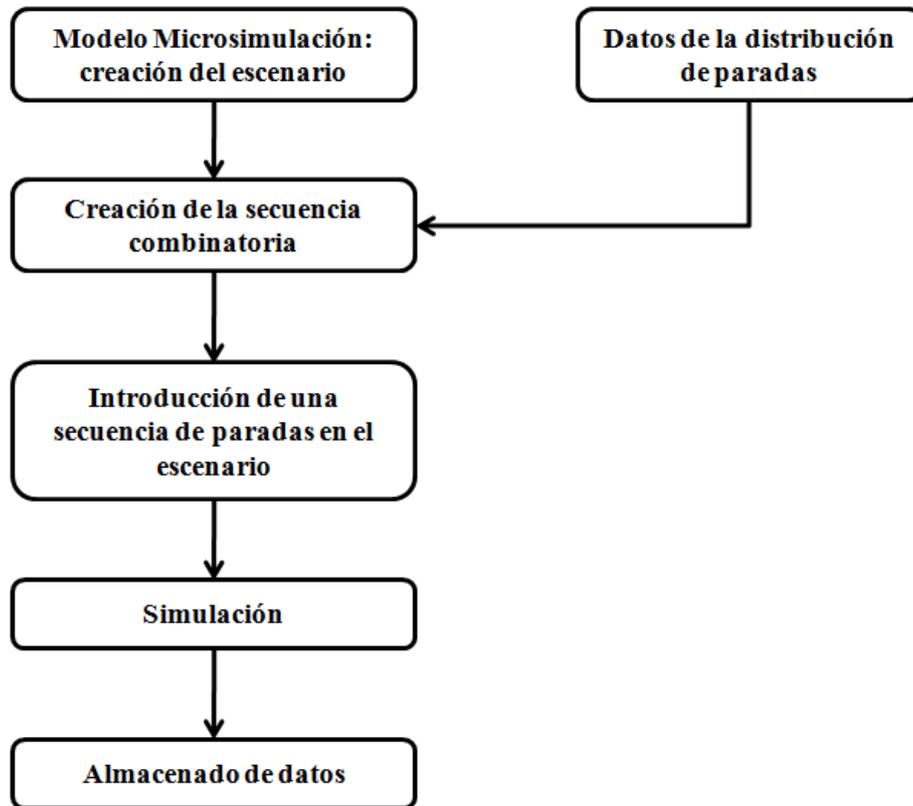


Fig. 16.1.- Diagrama de flujo de la macro diseñada.

Etapa 1: Una vez creado el vector \overline{M} , se procede a crear un vector inicial \overline{M}^0 en el que cada parada o elemento i tomará un valor entre 1 y p_i de manera aleatoria.

Etapa 2: Con este vector inicial se realizan las simulaciones microscópicas del escenario, registrando finalmente el parámetro a optimizar, por ejemplo, la velocidad comercial del bus.

Etapa 3: Una vez terminado el proceso, el algoritmo de búsqueda genera otro vector \overline{M}^n y se vuelve a la Etapa 2.

Etapa 4: Cuando el número de iteraciones del algoritmo de búsqueda haya concluido, se realiza una búsqueda del parámetro obtenido en cada \overline{M}^n , obteniendo el vector



cuyo valor sea mínimo. La ubicación final de las paradas en el eje será la definida por ese vector.

La figura 16.1 muestra el diagrama de flujo de la macro realizada, y en el Apéndice III se puede ver el código de la misma.

16.4. DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE MICROSIMULACIÓN AIMSUN®.

AIMSUN® es un software integrado de modelización de transporte desarrollado por la empresa TSS-Transport Simulation Systems con sede en Barcelona. El programa tiene integrados tres tipos de modelos: macroscópico, mesoscópico y microscópico.

La simulación microscópica se basa en las tres etapas clásicas: construcción del modelo, simular-calibrar-validar y análisis de resultados.

Construcción del modelo:

La primera etapa es la de construir el modelo sobre el cual se van a realizar las simulaciones. Para ello, será necesario construir lo que se llama el *modelo de la red vial* a nivel de secciones (carriles, líneas de división...), intersecciones (giros, prioridades...), centroides y equipamiento (señales, semáforos, meterings, detectores, paradas de bus...). Además se deberán introducir datos de operación de la red y del transporte público como recorridos de las líneas y sus horarios, control semafórico, etc.

Calibración-Validación:

La calibración del modelo se basa a su vez en varios sub-modelos, entre los cuales se pueden destacar:

- El *modelo del tráfico* mediante la introducción de la demanda (en base a una matriz O/D o aforos), definir un patrón de llegadas para el tráfico (exponencial, uniforme, binomial, etc.), definir los atributos de cada tipo de vehículos del área de estudio (dimensiones, aceleración, velocidad, tiempos de reacción, distancia en parada, etc.).
- El *modelo de seguimiento de vehículos (car following)* basado en el modelo empírico de Gipps (1981 y 1986b) que establece que la velocidad objetivo será



función de la máxima velocidad deseada, la limitación de velocidad del vial y las limitaciones impuestas por el vehículo precedente.

- El *modelo de cambio de carril (lane changing)* también basado en el modelo de cambio de carril de Gipps (1986a y 1986b) que se basa en un diagrama de decisión como el mostrado en la figura 16.2. Para su aplicación se definen 3 zonas durante la aproximación a un suceso, giro, etc. en cada una de las cuales va aumentando la necesidad de realizar la maniobra según se aproxime el vehículo al objetivo.
- El *modelo de aceptación de gap (gap acceptance)* que se basa en la regla lógica de brecha o hueco crítico para realizar una determinada maniobra.

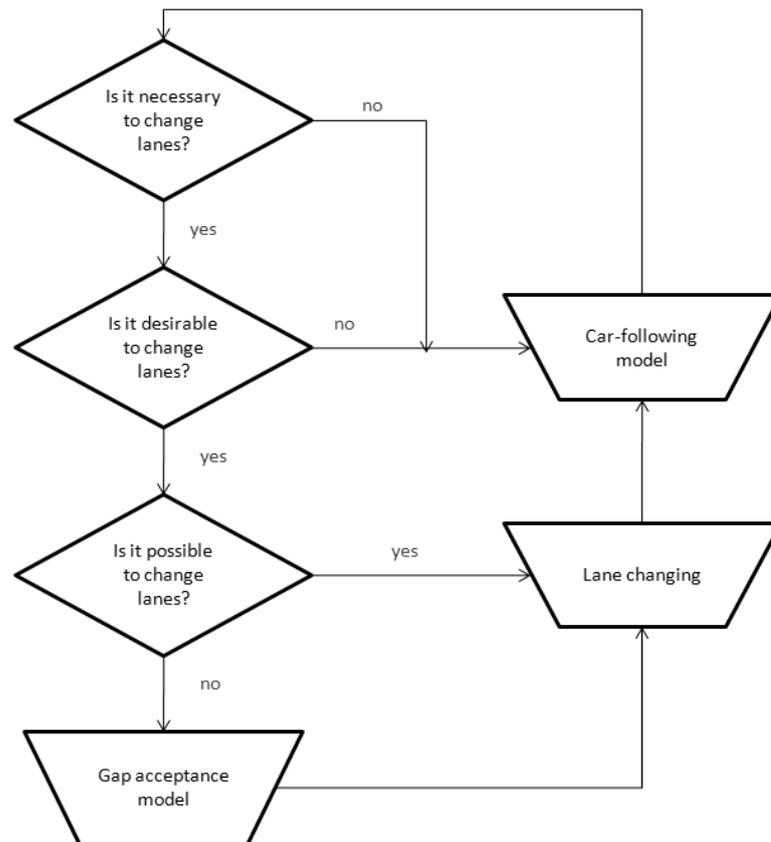


Fig. 16.2.- Diagrama de flujo del modelo de cambio de carril.

Simulación:

La lógica del proceso de simulación en AIMSUN se muestra en la figura 16.3.

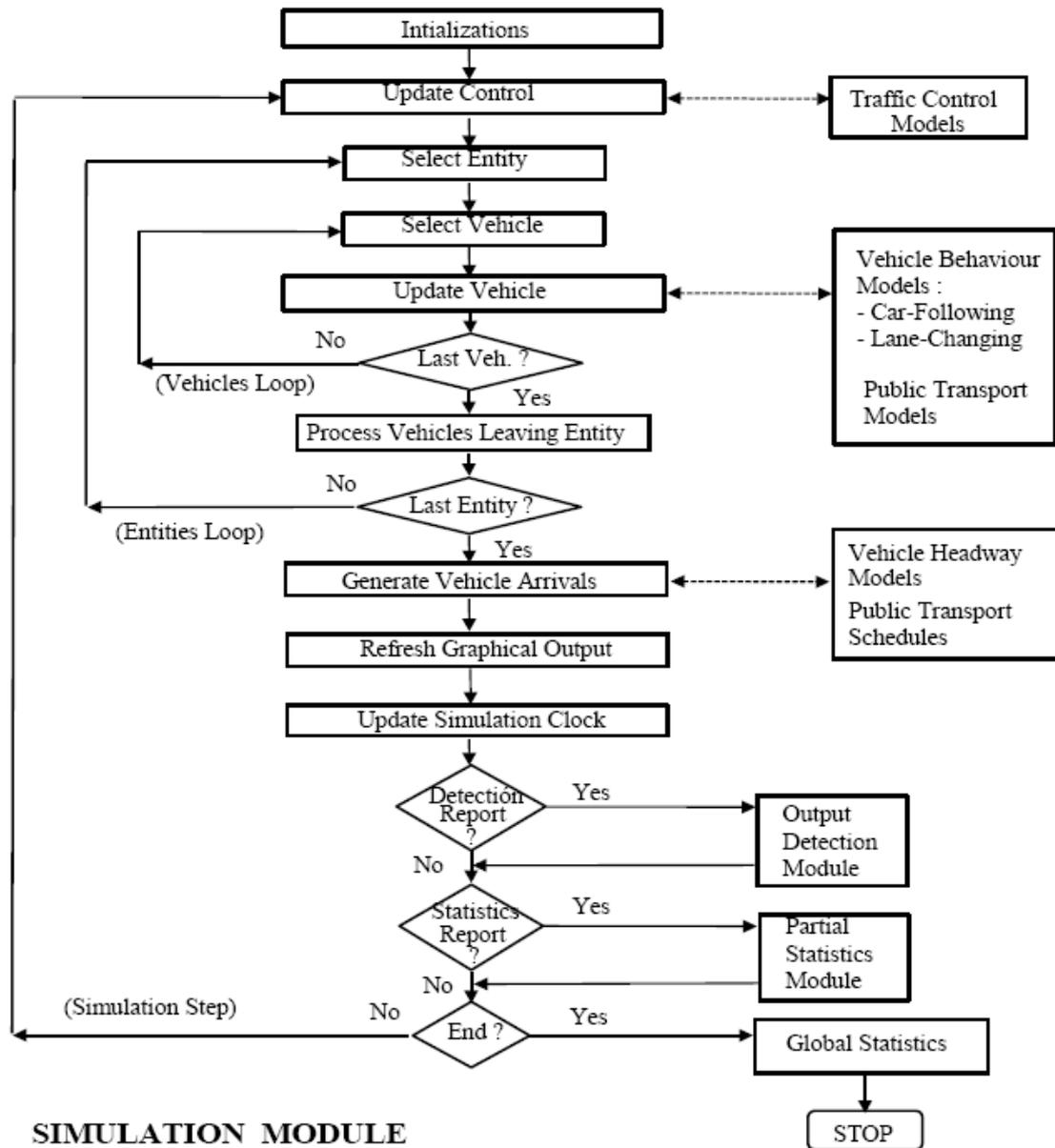


Fig. 16.3.- Diagrama de flujo del proceso de simulación (fuente: AIMSUN user's manual).

En cada intervalo de tiempo (*paso de simulación*) el ciclo de simulación actualiza los eventos en base a horarios (por ejemplo, fases semafóricas, salidas de vehículos de transporte público que no dependan de otros, etc.). Esto es lo que se llama como “*Update Control*” en el diagrama de la figura 16.3. Posteriormente, se actualizan todas las entidades (secciones de carretera e intersecciones) y todos los vehículos del modelo. Una vez que la última entidad ha sido actualizada, el simulador realiza las operaciones aún pendientes, como introducir nuevos vehículos, recogida de nuevos datos, etc.



Dependiendo del tipo de simulación, los vehículos nuevos se introducen en la red de acuerdo a los modelos de generación de flujo (distribuciones de intervalos, por ejemplo) en las secciones de entrada, finalizando el paso de simulación.

Capítulo 17

DISEÑO DE LOS ESCENARIOS



CAPÍTULO 17. DISEÑO DE LOS ESCENARIOS.

17.1. INTRODUCCIÓN.

A la hora de diseñar los escenarios no solo se deben tener en cuenta las posibles ubicaciones de la parada de bus, sino también otros aspectos como, por ejemplo, las llegadas de los usuarios a las paradas o los ciclos semafóricos.

Así, se analizarán varios casos hipotéticos atendiendo a diferentes combinaciones de distribuciones de llegadas de los pasajeros a las paradas, regulaciones semafóricas y demanda tanto de buses como de vehículos privados.

En lo que se refiere a la distribución de llegadas de pasajeros a las paradas, se introducirán demandas en intervalos de 15 minutos y dentro de cada intervalo se analizará en un primer caso que los usuarios llegan uniformemente a las paradas de bus a lo largo de la hora de simulación. Posteriormente, se supondrá una distribución exponencial negativa para las llegadas.

17.2. INCIDENCIAS Y OPERATIVA EN LA RED A NIVEL MICROSCÓPICO.

En el capítulo 10 se exponía la importancia de la modelización de las incidencias y aspectos operacionales de la red vial y del transporte público a la hora de simular la operación del transporte público, especialmente en lo que a tiempos de ciclo se refiere y su influencia en el tamaño de flota y coste del operador.

Más en concreto, se describían modelos para los elementos de control de tráfico, incidencias y maniobras de estacionamiento en la red vial y operación de los buses en paradas congestionadas, donde se incluía el efecto de espera en cola.

A la hora de simular todas estas variables a escala microscópica, los actuales simuladores permiten incluirlas de tal manera que se puede ver y analizar directamente sus efectos y repercusiones en cada instante temporal.

Así, se ha codificado la red ejemplo de los capítulos anteriores a nivel microscópico, un segmento de la cual se muestra en la figura 17.1. En ella se aprecia todo lo descrito anteriormente en cuanto a elementos semafóricos, colas de buses en las paradas y vehículos estacionando que bloquean temporalmente un carril.

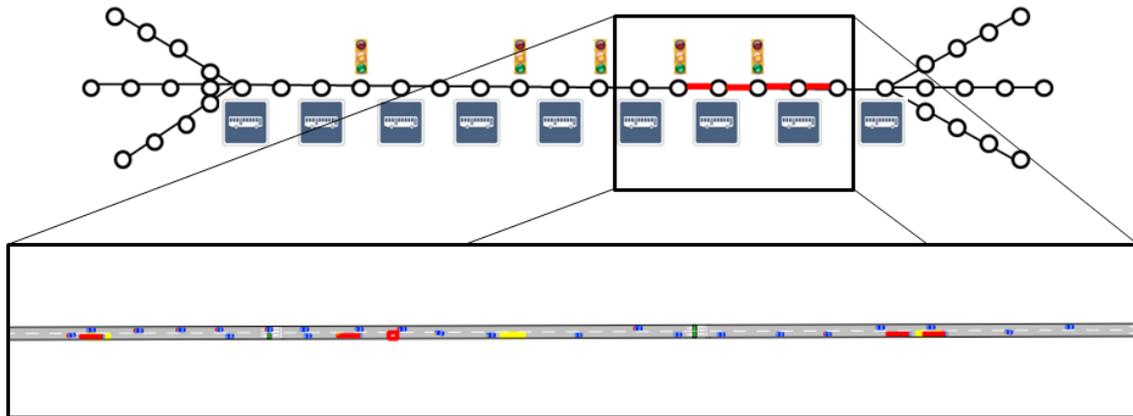


Fig. 17.1.- Microsimulación de un tramo del eje ejemplo.

Si se realiza una simulación completa del eje central de la red y se hace un seguimiento a cada vehículo de transporte público, se puede representar en un diagrama espacio-tiempo la trayectoria de cada bus.

Si se asume en una primera aproximación que el tiempo empleado por un bus es solamente dependiente de su velocidad en el arco y de un tiempo prefijado en cada parada, y se compara este tiempo con el obtenido de la simulación se pueden observar importantes diferencias, tal y como se exponía en el ejemplo del capítulo 10. Es lo que se representa en las figuras 17.2 y 17.3 para las líneas de transporte público L1 y L7. Como se puede apreciar, la diferencia de la trayectoria teórica (en azul) con la simulada (en verde) es notable en todos los servicios. Además, existen buses que llegan a alcanzarse, con lo que la frecuencia percibida por un usuario de esa línea disminuye.

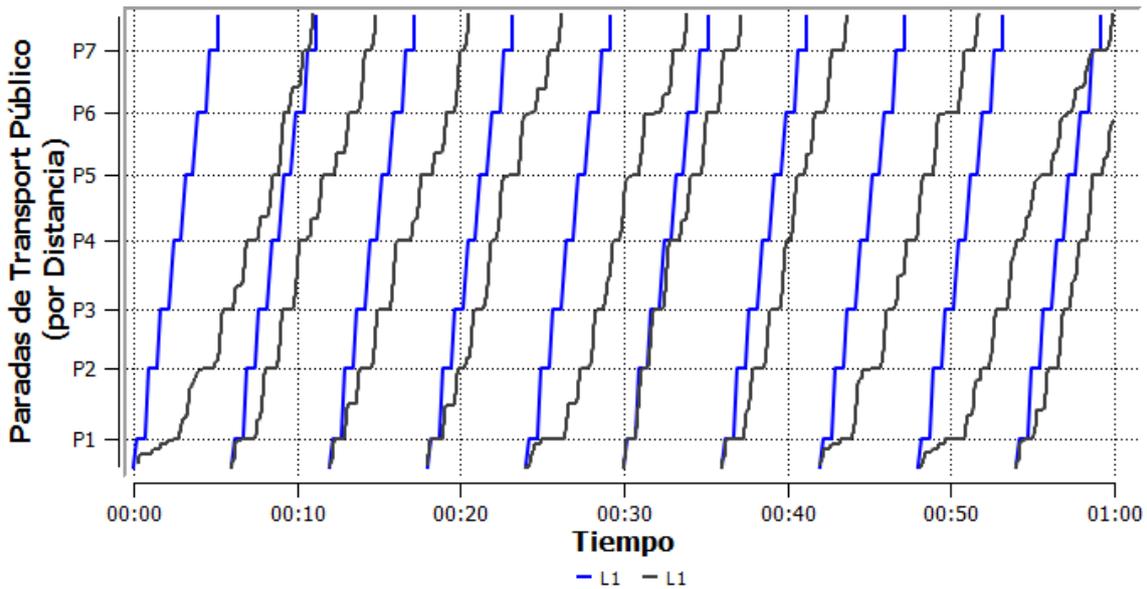


Fig. 17.2.- Diagrama espacio-tiempo teórico y simulado de la L1.

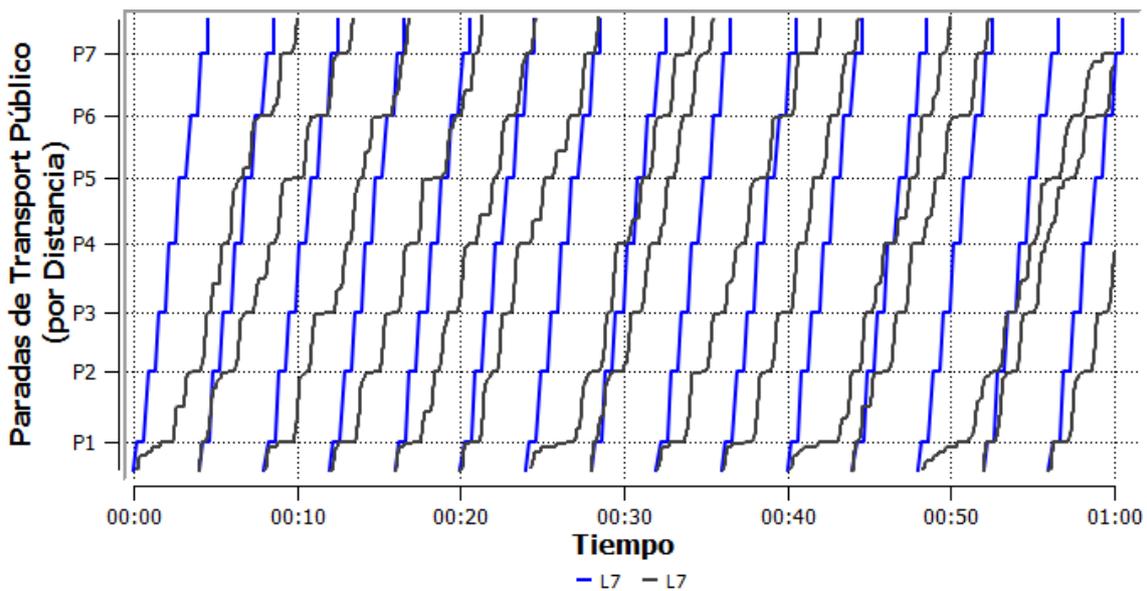


Fig. 17.3.- Diagrama espacio-tiempo teórico y simulado de la L7.

Este efecto representado para líneas individuales se vuelve más notorio para todo el conjunto que opera en el eje. De esta manera, asumiendo incluso que existiera una coordinación perfecta de todas las líneas a la hora de entrar en el eje central, de tal forma que tuvieran un intervalo constante, a medida que van recorriendo dicho eje éste se iría descoordinando, y, a su vez, disminuyendo la velocidad comercial tal y como se muestra en las figuras 17.4 y 17.5.

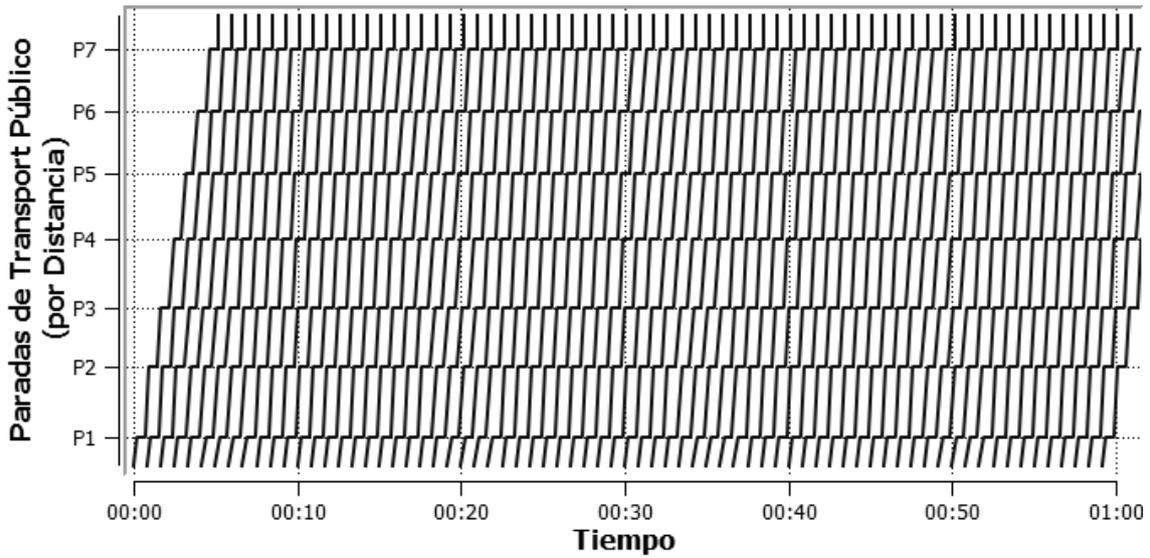


Fig. 17.4.- Diagrama espacio-tiempo teórico de todas las líneas en el eje central.

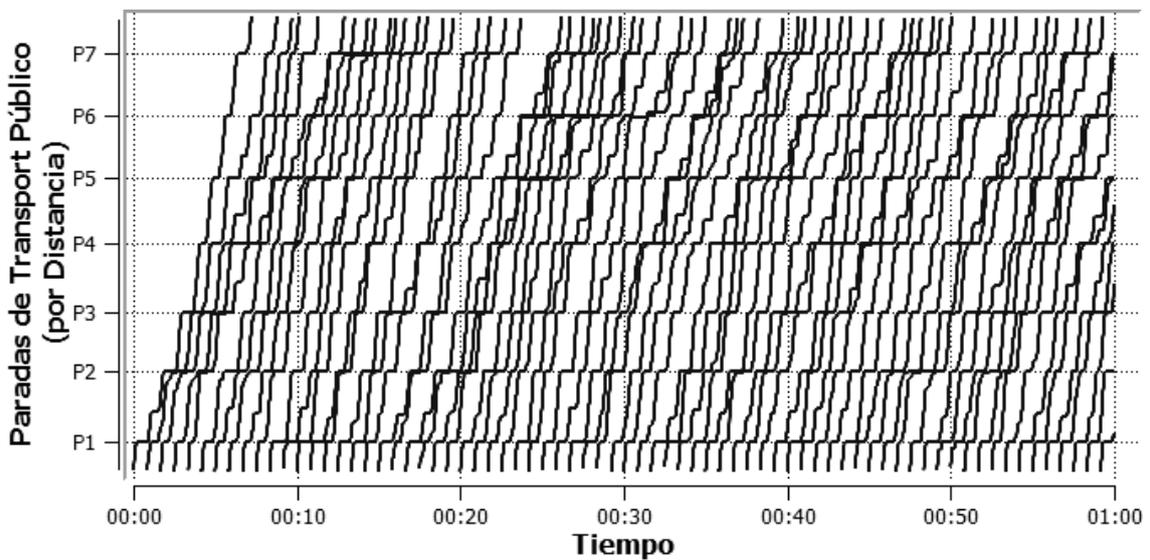


Fig. 17.5.- Diagrama espacio-tiempo simulado de todas las líneas en el eje central.

17.3. PROPUESTA DE LAS DIFERENTES ALTERNATIVAS PARA CADA PARADA DENTRO DEL CORREDOR.

Una vez que se han volcado los puntos de parada de bus del nivel macro, se han de proponer las diferentes alternativas para cada una de ellas. Esta es una labor que ha de realizar el planificador del sistema ya que depende de la topología de la zona así como también de su experiencia.

Existen varias topologías de parada, a partir de la cual se pueden configurar las ubicaciones posibles:

Parada Mid-block con semáforo:

El primer caso que aquí se presenta es la parada tipo Mid-block, ubicada en un punto intermedio del vial alejado de intersecciones, pero con la existencia de un semáforo próximo, se han situado alternativas aguas arriba más y menos alejadas del mismo y aguas abajo.



Fig. 17.6.- Diferentes alternativas para una parada antes y después de un semáforo.

Gibson (1996) realizó un estudio utilizando el modelo IRENE (Gibson et al., 1989) para este caso aislado, analizando varias regulaciones semafóricas (en cuanto a proporción de verde (u) y ciclos (c)), diferentes distancias al semáforo (A) y dos disciplinas de cola en la parada: FIFO (First In First Out) y FIAO (First In Any Out). Para cada combinación de valores de estas variables obtuvo la reducción de capacidad de la parada debido al efecto del semáforo, representado en la siguiente tabla:

Tabla 17.1.- Porcentaje de capacidad básica de una parada (Gibson, 1996).

Disciplina		FIFO			FIAO		
D [bus]	C [s] U	60	90	120	60	90	120
0	0.38	46	52	38	71	59	52
	0.48	50	53	41	78	67	65
	0.58	63	55	55	81	77	73
	0.68	81	81	86	88	84	80
1	0.38	85	78	73	80	74	68
	0.48	87	83	80	84	78	76
	0.58	87	87	87	87	84	82
	0.68	87	87	87	90	88	88
3	0.38	96	72	69	91	84	81
	0.48	99	77	75	92	90	86
	0.58	99	83	84	94	91	90
	0.68	100	88	90	96	94	92

⁽¹⁾: Capacidad sin semáforo aguas abajo; FIFO: 228 [bus/h] y FIAO: 241 [bus/h]

Analizando la tabla 17.1 y los resultados obtenidos en dicha investigación se llega a la conclusión que, para una ubicación aguas arriba del semáforo, la distancia al mismo debe ser equivalente a 3 buses (aprox. 36 metros).

Parada Near-side – Far-side en intersección con y sin semáforo:

En el caso de existir una intersección con otra calle se proponen alternativas antes (Near-side) y después (Far-side) de la intersección como se muestra en la figura 17.7. Al igual que ocurría con la parada de tipo Mid-block con semáforo, las alternativas Near-side serán dos, estando cada una de ellas más y menos alejadas de la línea de detención. Realmente este es un caso similar al anterior (Mid-block con semáforo) en cuanto a que las paradas antes y después del semáforo son equivalentes en ambos casos.

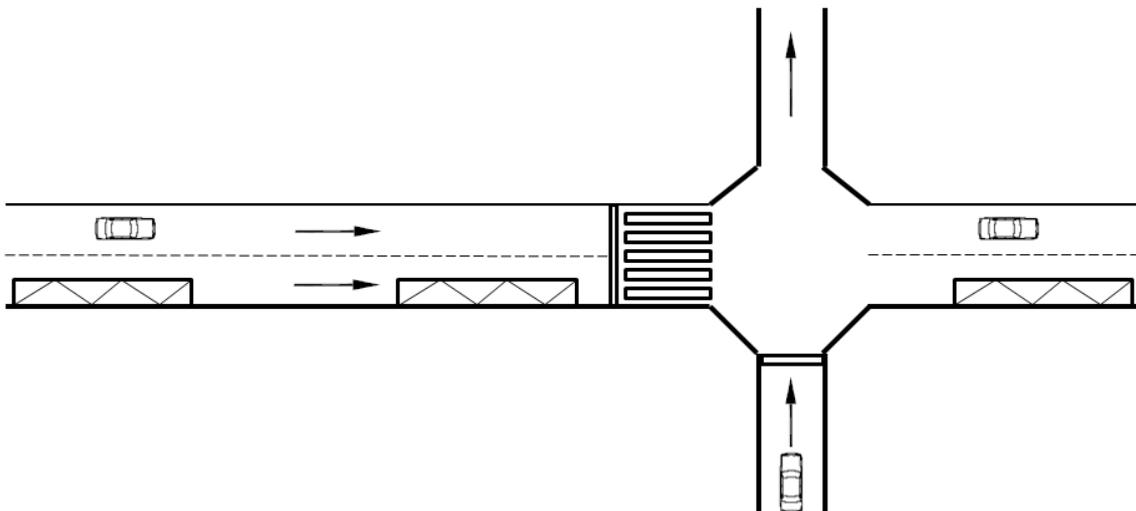


Fig. 17.7.- Diferentes alternativas para una parada en una intersección.

Furth y San Clemente (2006) analizan las demoras de los buses en paradas de bus aguas arriba (Near side) y aguas debajo (Far side) de una intersección con semáforo. En su estudio analizan una gran variedad de casos posibles variando la proporción de verde y la distancia de la parada Near side con respecto al semáforo. Las demoras finales extraídas aconsejan la ubicación de las paradas de bus aguas abajo del semáforo y de la intersección. Esta solución, según las variables de análisis, es similar a la ubicación de la parada aguas arriba del semáforo a una distancia suficiente como para que la cola de vehículos no la alcance, tal y como recomendaba Gibson en su estudio.

Tabla 17.2.- Demoras para paradas near-side y far-side (Furth y San Clemente, 2006)

	Near Side		Far-Side	No Stop
	No Overtaking	Overtaking		
E (delay) (s/bus)	53.8	55.6	44.5	20.7
Min. delay (s)	32.9	34.9	24.1	0.0
Max. delay (s)	86.1	86.1	69.3	47.3
Std. dev. (delay) (s)	14.4	13.8	14.8	15.3
E (net delay) (s/bus)	8.9	10.8	-0.4	—

Parada de bus dividida con y sin semáforo:

En las paradas de bus divididas, se jugará con la distancia entre las dos áreas de parada (d) y, en caso de existir un semáforo, se analizará la conveniencia de su completa ubicación aguas arriba o aguas abajo del mismo, o bien ubicar un área a cada lado.

A diferencia de los dos casos anteriores, no se han encontrado estudios que analicen la ubicación de una parada dividida en las proximidades de un semáforo. Sí existen estudios sin embargo, acerca de la distancia d recomendable entre las áreas de parada, pero siempre bajo el supuesto de una ubicación Mid-block (Fernández, 2001a y Fernández y Tyler, 1999) como ya se ha expuesto en el capítulo 13.

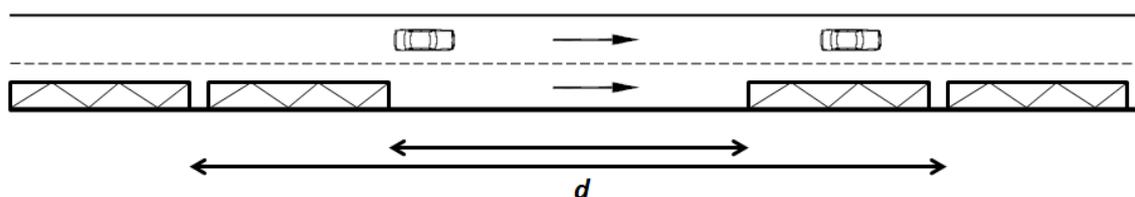


Fig. 17.8.- Esquema de parada de bus dividida.

17.4. ESCENARIO CON LLEGADA CONSTANTE DE VIAJEROS A LAS PARADAS.

En este primer caso se propone que la llegada de viajeros a las paradas es contante, es decir, llegan el mismo número de viajeros a la parada en cada intervalo de tiempo



Del modelo de macrosimulación se obtiene el número de pasajeros que llega a cada parada en una hora para cada línea.

Para obtener el tiempo que permanece el autobús detenido en cada parada, se parten del número de pasajeros que, en una hora, abordan un bus de la línea l en la parada p NP_l^p .

Por otro lado, el tiempo esperado de paso entre dos buses consecutivos de una línea l (h_l) será inversamente proporcional a su frecuencia f_l :

$$h_l = \frac{1}{f_l} \quad (17.1)$$

Asumiendo la llegada constante de viajeros a las paradas, la tasa de llegadas de los pasajeros de la línea l a la parada p por minuto será:

$$m_l^p = \frac{NP_l^p}{60} \quad (17.2)$$

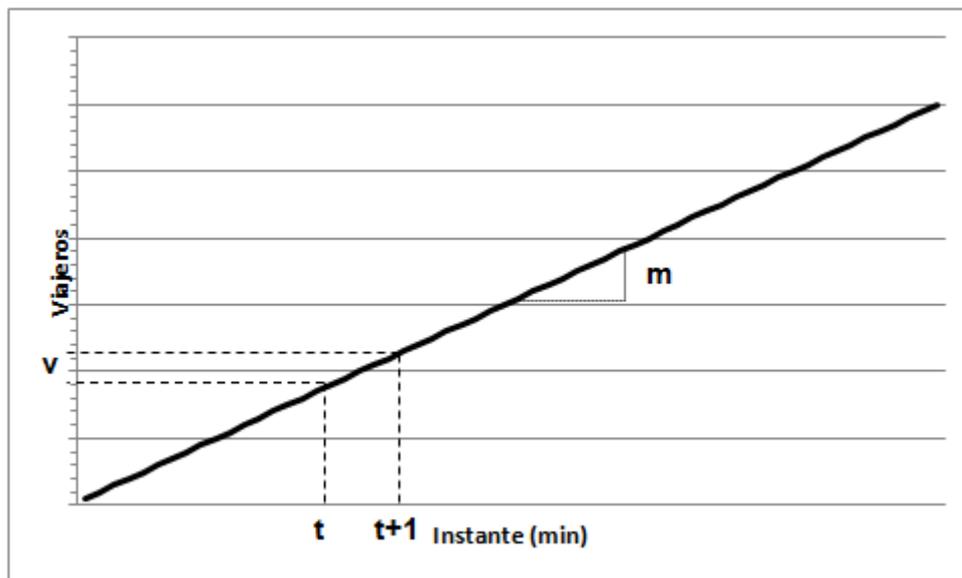


Fig. 17.9.- Distribución de llegadas uniforme.

Si el sistema fuera perfecto, el tiempo de operación de un autobús de la línea l en la parada p debiera ser:

$$t_l^p = m_l^p \cdot (ts/60) \cdot h_l \quad (17.3)$$



Siendo t_s la tasa media de subida por pasajero, en sg/pax (asumiendo la subida como predominante).

Sin embargo, en los sistemas de transporte público reales, no siempre es posible mantener constantes los intervalos entre vehículos de transporte público a lo largo de un corredor o un eje urbano. Estos desfases se pueden deber por acumulación de buses de varias líneas en las paradas, por causas debidas al tráfico y sus elementos de control o bien por variaciones temporales de la propia demanda. Esta diferencia de intervalos hace que, para cada bus de una línea l , el número de viajeros que suben/bajan del bus sean diferentes. Este hecho, favorece aun más la descompensación de los intervalos a medida que se avanza en el corredor, llegándose incluso a juntar dos buses de una misma línea.

Por lo tanto, puede redefinirse el tiempo de detención anterior desagregándolo a cada bus b de la línea l en la parada p como función del intervalo ese bus b y el bus precedente de su misma línea ($b-1$).

$$t_{l,b}^p = m_l^p \cdot (t_s/60) \cdot h_{l,b;b-1} \quad (17.4)$$

17.5. ESCENARIO CON LLEGADA EXPONENCIAL DE VIAJEROS A LAS PARADAS.

En este caso se considera que la demanda se concentra en el inicio de la hora de simulación, disminuyendo a medida que se avanza en el tiempo. Si se asume que la llegada de los viajeros a la parada sigue una exponencial negativa, el número de viajeros de una línea l que han llegado hasta un instante t a la parada p será:

$$v_l^p(t) = (1 - e^{-\gamma t}) \cdot V_l^p \quad (17.5)$$

donde:

γ = parámetro de la exponencial.

V_l^p = es el número total de viajeros en el período de simulación de la línea l en la parada p .

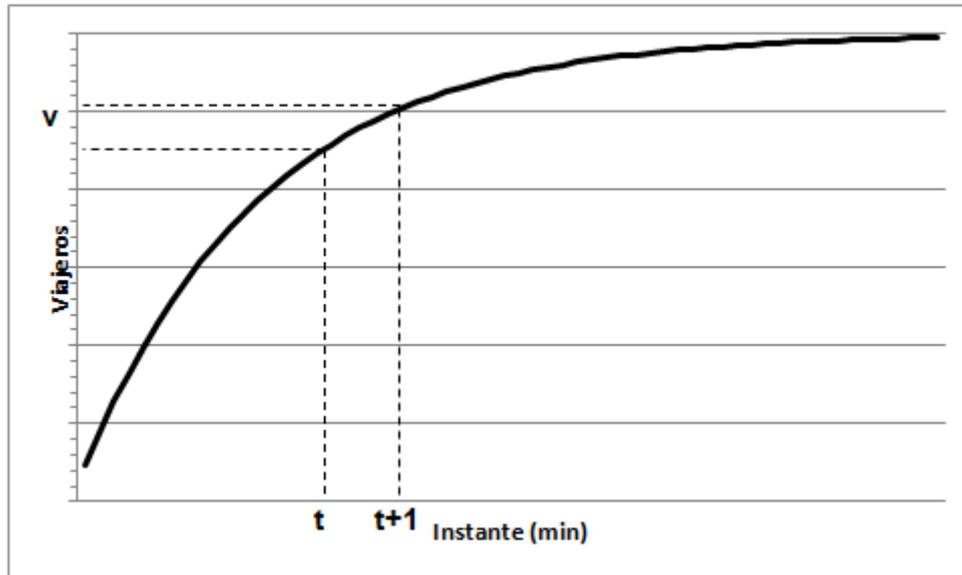


Fig. 17.10.- Distribución de llegadas exponencial.

Por lo tanto, puede definirse el tiempo de detención del bus b de la línea l en la parada p como función del intervalo entre ese bus b y el bus precedente de su misma línea ($b-1$)

$$t_{l,b}^p = V_l^p \cdot \left[e^{(-\gamma t_b)} - e^{(-\gamma t_{b-1})} \right] \quad (17.6)$$

Capítulo 18

EJEMPLO DE APLICACIÓN



CAPÍTULO 18. EJEMPLO DE APLICACIÓN.

Para mostrar el funcionamiento del modelo se ha diseñado un ejemplo consistente en un tramo de 700 metros de un eje urbano por el que discurre una línea de transporte público, con un intervalo de 1 minuto. Existen además 4 semáforos con un ciclo de 90 sg y 0.6 de proporción de verde efectivo. En dicho eje, el modelo macroscópico ha posicionado 3 paradas separadas 200 metros entre sí, ubicadas en los puntos mostrados en la figura 18.1 (zonas amarillas). Dichas paradas, siguiendo la dirección del tramo Oeste-Este se denominarán P1, P2 y P3 respectivamente.

En el caso considerado, la parada P1 está ubicado justo en la línea de detención de un semáforo, la parada P2 es del tipo mid-block sin semáforo y la parada P3 es del tipo far-side en una intersección semaforizada. En base a esto, se definirán una serie de ubicaciones alternativas a cada parada representadas en la figura 18.3:

- Parada P1: ubicación actual (1), aguas arriba alejada del semáforo (2) y aguas abajo del mismo (3).
- Parada P2: ubicación actual (1).
- Parada P3: ubicación actual (1), near-side junto al semáforo (2) y near-side aguas arriba del semáforo y más alejada del mismo (3).

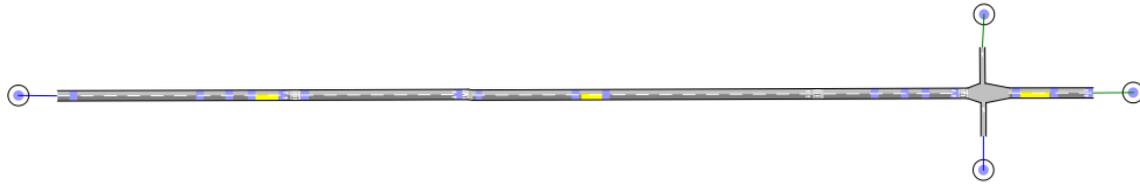


Fig. 18.1.- Ubicación inicial obtenida del modelo macroscópico.

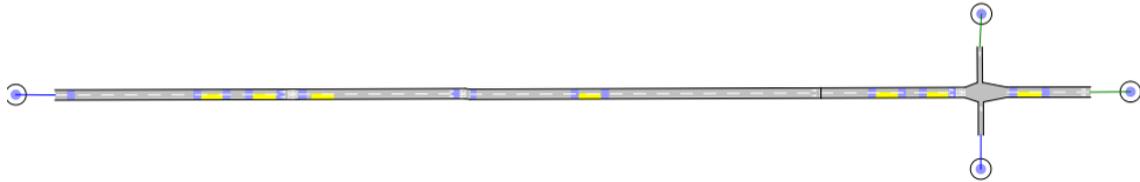


Fig. 18.2.- Alternativas de ubicación en cada parada.

Por lo tanto, el vector $[\overline{M}]$ tendrá tres componentes: uno para la parada P1, con posibles valores: (1, 2, 3), otro para la parada P2 con un único valor (1) y otro para la parada P3 también con valores (1, 2, 3).

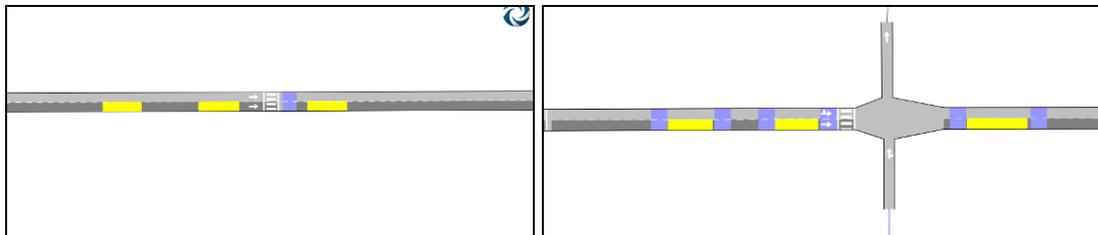


Fig. 18.3.- Alternativas de ubicación para las paradas P1 (izda.) y P3.

Así, la secuencia de vectores $[\overline{M}^n] = [(P1), (P2), (P3)]$ para cada combinación n vendrá dada por:

n=1: [1, 1, 1]; n=2: [2, 1, 1]; n=3: [3, 1, 1]; n=4: [1, 1, 2]; n=5: [2, 1, 2]; n=6: [3, 1, 2];
n=7: [1, 1, 3]; n=8: [2, 1, 3]; n=9: [3, 1, 3]

En total se obtienen 9 vectores que barren todas las combinaciones de ubicación final posible. Del modelo macroscópico se han obtenido, además, los datos de flujo (veh/hora) y pasajeros que suben y bajan en cada línea y en cada parada.

Con todos los datos ya introducidos al modelo de microsimulación se realizan simulaciones con cada vector, recogiendo los datos de demoras y velocidad comercial en una base de datos, los cuales se han representado en la figura 18.4.

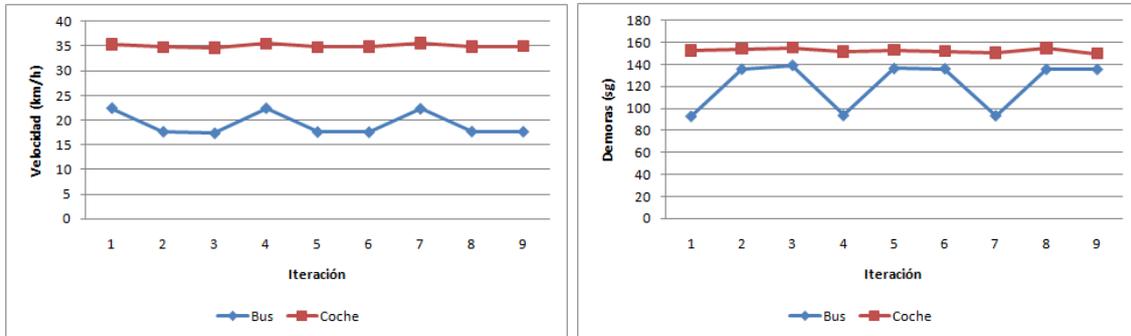


Fig. 18.4.- Velocidad comercial y demoras para cada combinación (iteración) de paradas.

Como se puede ver, existen variaciones importantes en la velocidad comercial del bus en función de la ubicación de las paradas, variando entre 22.45 km/h y 17.43 km/h. Así, el vector que mayor velocidad del bus ha obtenido ha sido el de la iteración nº 1, en el cuál todas las paradas están aguas arriba del semáforo y alejadas del mismo. Este resultado es similar para la ubicación near-side o far-side de la parada 3 (iteraciones 4 y 7 respectivamente).

Además, si se representan los diagramas espacio-tiempo para la mejor ubicación, y se comparan con las ubicaciones (2, 1, 2) y (3, 1, 3) que han arrojado las velocidades comerciales más bajas, se puede distinguir claramente el número de detenciones realizadas por cada bus. Por ejemplo, para el vector (2, 1, 2) en el que las paradas P1 y P3 están ubicadas en las inmediaciones de la línea de detención de los semáforos, los buses deben detenerse antes de alcanzar la P1 debido a la cola de vehículos que se forma durante el tiempo de rojo y después de la P1 en muchos casos debido a que le vuelve a afectar otro tiempo de rojo. Lo mismo sucede con la P3.

Por su parte, en el vector (3, 1, 3), el número de detenciones es menor que en el caso anterior puesto que se detiene una vez debido al semáforo y otra en la propia parada P1.

Pueden apreciarse incluso sensibles variaciones en los intervalos entre buses para cada vector representado con valores extremos mayores en los dos casos con respecto al de mayor velocidad comercial.

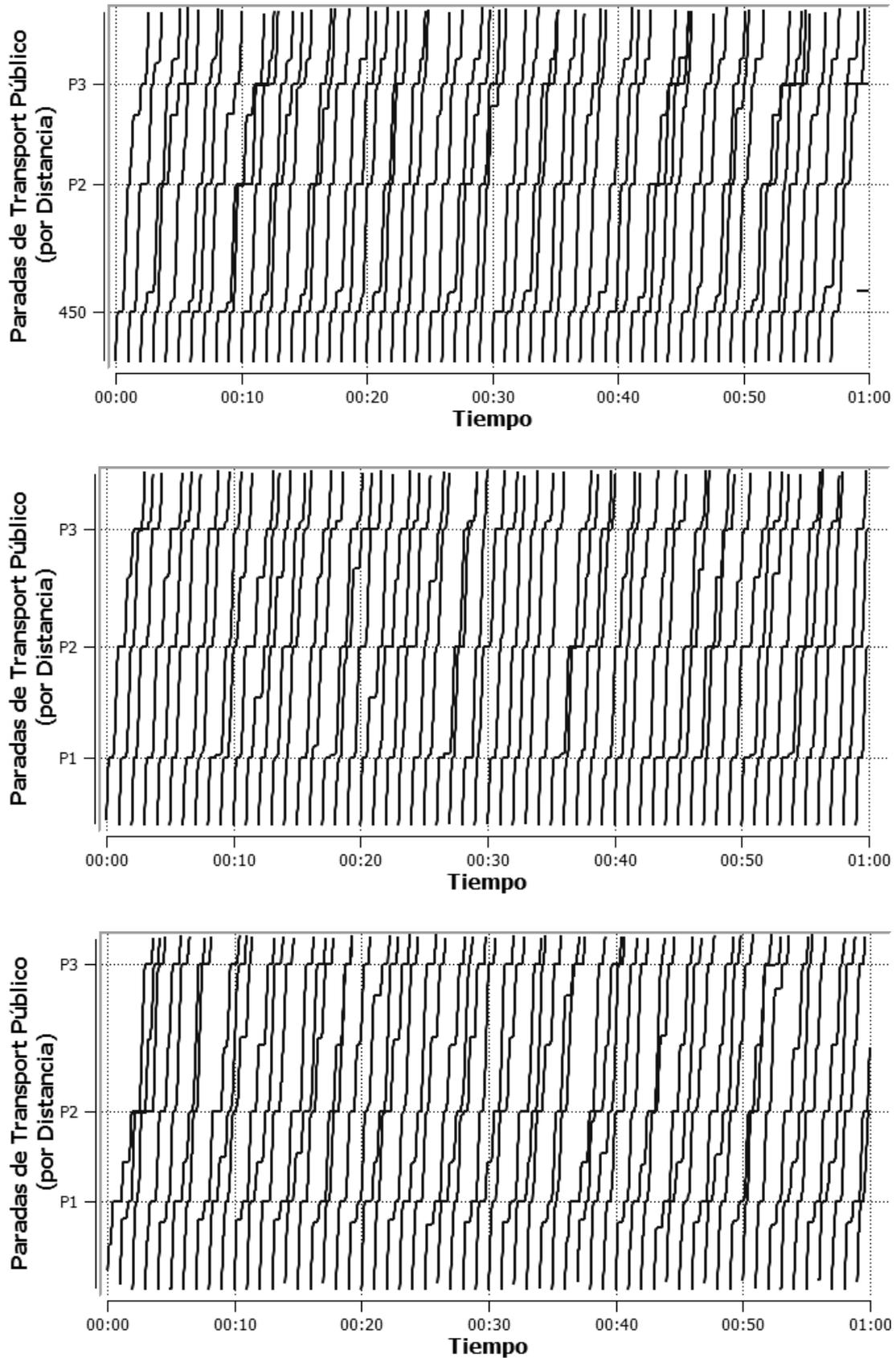


Fig. 18.5.- Diagramas espacio-tiempo de la solución óptima (arriba), near-side (vector [2, 1, 2], centro) y far-side (vector [3, 1, 3]).

**PARTE VI: APLICACIÓN A UN CASO REAL: LA
CIUDAD DE SANTANDER**

Capítulo 19

DESCRIPCIÓN



CAPÍTULO 19. DESCRIPCIÓN.

19.1. INTRODUCCIÓN. METODOLOGÍA DE APLICACIÓN.

Para comprobar la validez y utilidad de los modelos expuestos en esta tesis, se han 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 habitantes situada al norte de España y que actualmente cuenta con un sistema de transporte urbano en superficie (bus) ya consolidado.

La aplicación de los modelos propuestos a la ciudad de Santander se estructura en dos bloques principales, de acuerdo a la estructura seguida en esta tesis: El primer bloque es el denominado Nivel Estratégico, en el que se aplicarán los modelos macroscópicos y analíticos desarrollados y expuestos a toda la ciudad y su sistema de transporte. El segundo bloque es el Nivel Táctico, donde se hará uso del modelo de microsimulación, focalizando el estudio en el eje principal de la ciudad.

19.1.1. NIVEL ESTRATÉGICO.

El primer paso en todo modelo aplicado a un caso real es la calibración de la situación actual. Para ello se toma como base el proyecto: “Modelo de Movilidad de la ciudad de Santander” (Ibeas et al., 2007). Además se deberán calibrar y validar las funciones de flujo-demora en arcos, penalización por elementos de control en nodos, reducciones de capacidad debidas a incidencias en la red, tiempo de detención de los vehículos de transporte público en las paradas, y se aplicará a aquellas paradas con problemas de capacidad que deban dividirse, el modelo de asignación de líneas a paradas de bus

divididas que constituyen los modelos descritos en la parte IV de esta tesis. Con el modelo ya calibrado y validado, se aplicará el modelo macroscópico de ubicación de paradas de bus, descrito en la parte III de esta tesis, partiendo de la configuración actual de las paradas en la ciudad.

19.1.2. NIVEL TÁCTICO.

El eje (o ejes) que será objeto de estudio debe ser codificado, calibrado y validado para la situación actual. Posteriormente, la solución final obtenida del nivel estratégico, se vuelca al modelo de microsimulación, planteando para cada parada, y en función de su ubicación preliminar dada, varias alternativas para su localización final.

Finalmente, se aplica el modelo de ubicación microscópica expuesto en la parte VI de esta tesis, obteniendo la ubicación final de las paradas de bus en el eje.

La siguiente figura muestra es esquema de aplicación global:

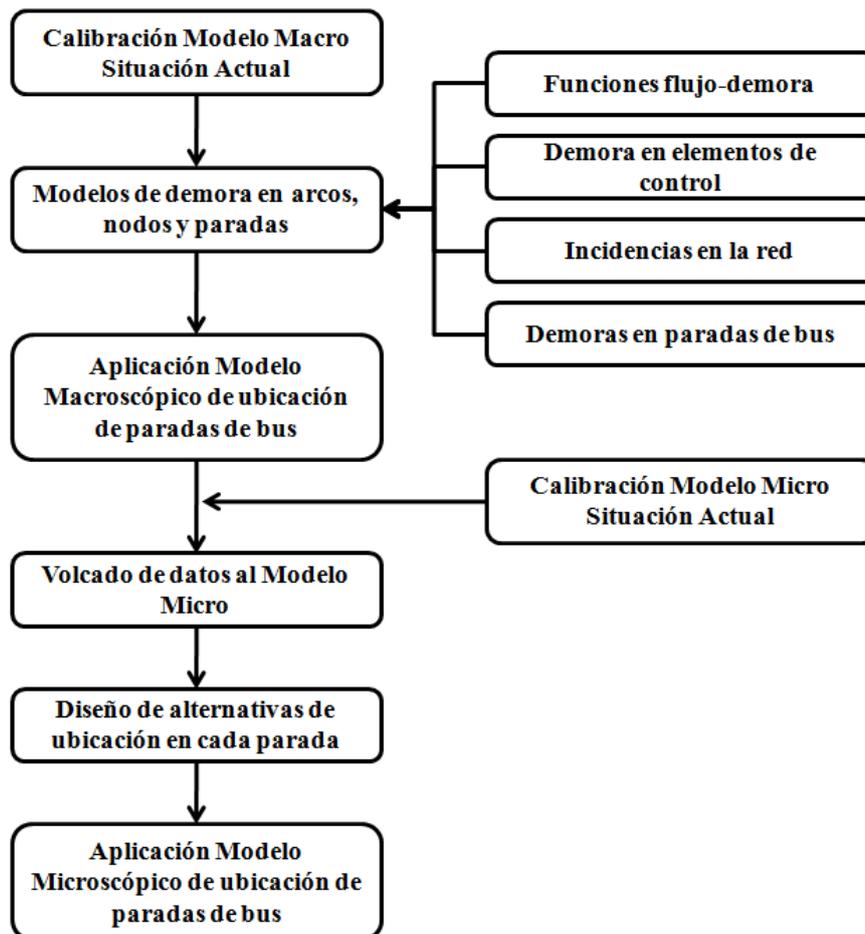


Fig. 19.1.- Metodología seguida a nivel Macro y Micro.

19.2. LA CIUDAD DE SANTANDER.

19.2.1. MORFOLOGÍA, POBLACIÓN Y ACTIVIDAD:

La ciudad de Santander se encuentra situada a 4° de longitud Oeste y a 43° de latitud Norte. El Ayuntamiento de Santander tiene actualmente una población alrededor de los 180.000 habitantes y una superficie de 33,9 kilómetros cuadrados.

La ciudad se caracteriza por su estructura lineal (figura 19.1), con un centro de gran desarrollo comercial y urbanístico y varias zonas residenciales en la periferia de desigual densidad de población. La figura 19.2 representa la distribución de la población, apreciándose la polarización de la misma hacia las zonas periurbanas.



Fig. 19.2.- La ciudad de Santander.

La ciudad presenta un sensible desequilibrio en los meses de invierno y verano. Así, mientras que en la época no estival la gran mayoría de viajes se producen hacia/desde el centro de la ciudad, en verano estos son focalizados en la zona de playas, ubicadas en su mayoría en el extremo este. Además, la población en las zonas adyacentes a la playa es en su mayoría vacacional con segunda residencia en la ciudad.

Su distribución geográfica longitudinal y montañosa en torno al norte de la bahía de Santander y la creciente densificación urbana hace que el transporte colectivo sea fundamental en el desarrollo de la movilidad mientras que el coche privado encuentra dificultades por la saturación en el propio City Center. Los viajes a pie también tienen importancia en los desplazamientos dentro de la ciudad.

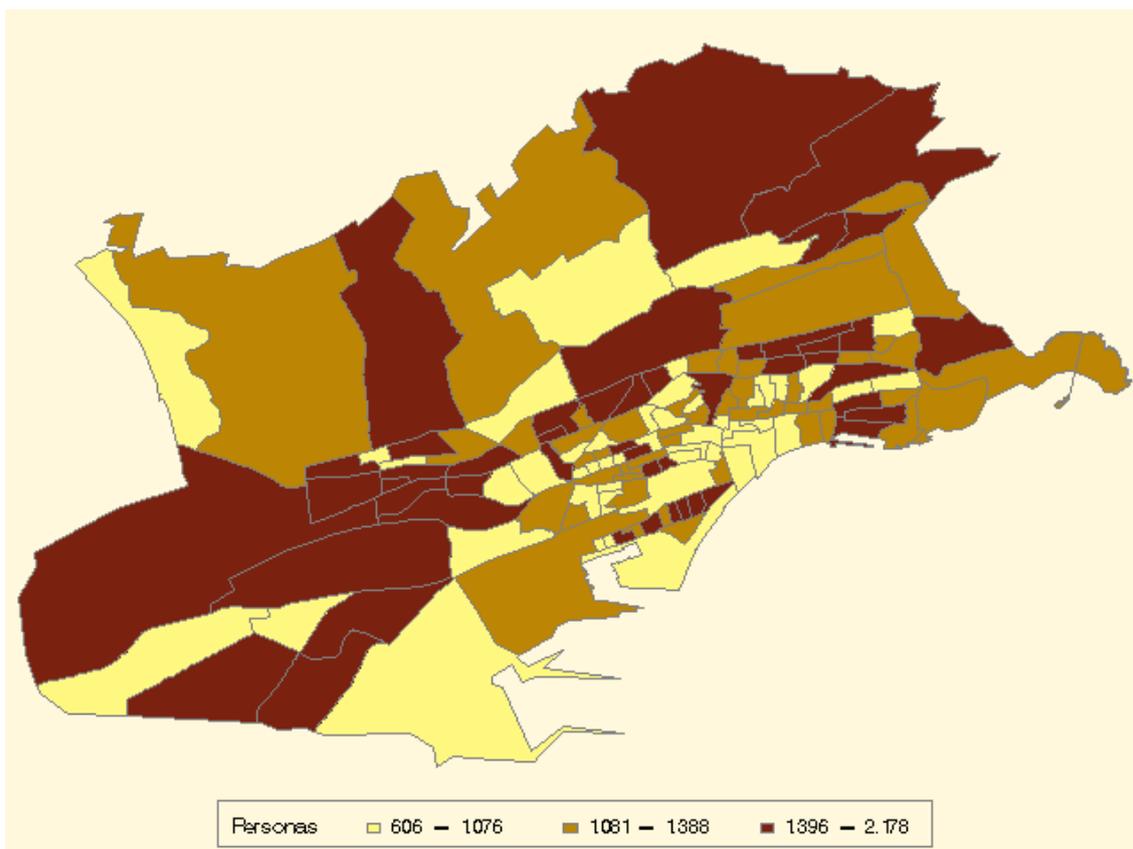


Fig. 19.3.- Distribución de población por zona censal.

19.2.2. SISTEMA VIARIO Y ACCESOS.

Debido a su ubicación geográfica, la ciudad limita al Norte con el Mar Cantábrico y al Este y Sur con la bahía, por lo tanto, todos los accesos a la ciudad se realizan desde el Oeste.

La orografía del terreno donde la ciudad se encuentra asentada ha provocado un déficit de conectividad transversal.

Realizando un corte transversal (norte-sur) a la dirección longitudinal de la ciudad se puede apreciar esta compleja orografía compuesta por dos vaguadas (figuras 19.3 a 19.5).



Fig. 19.4.- Secciones de la ciudad.



Fig. 19.5.- Perfil transversal A-A'.

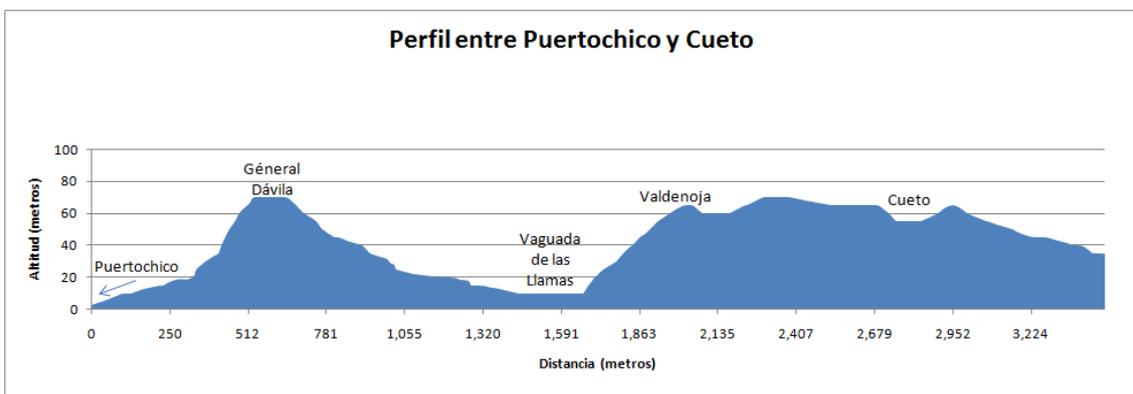


Fig. 19.6.- Perfil transversal B-B'.

Debido a esto, el sistema viario se articula según los siguientes ejes longitudinales que conectan la ciudad de Este a Oeste (figura 19.6):

1. El eje portuario de Castilla-Hermida (acceso Bilbao).
2. El eje centro (Hospital-Puertochico).
3. Paseo del Gral. Dávila.
4. Avda. de Los Castros.
5. S-20.

Sin embargo, los ejes transversales (Sur-Norte) solamente son dos, más un tercero actualmente en ejecución:

1. C. A. Vega-Casimiro Sainz.
2. Túnel de Tetuán.

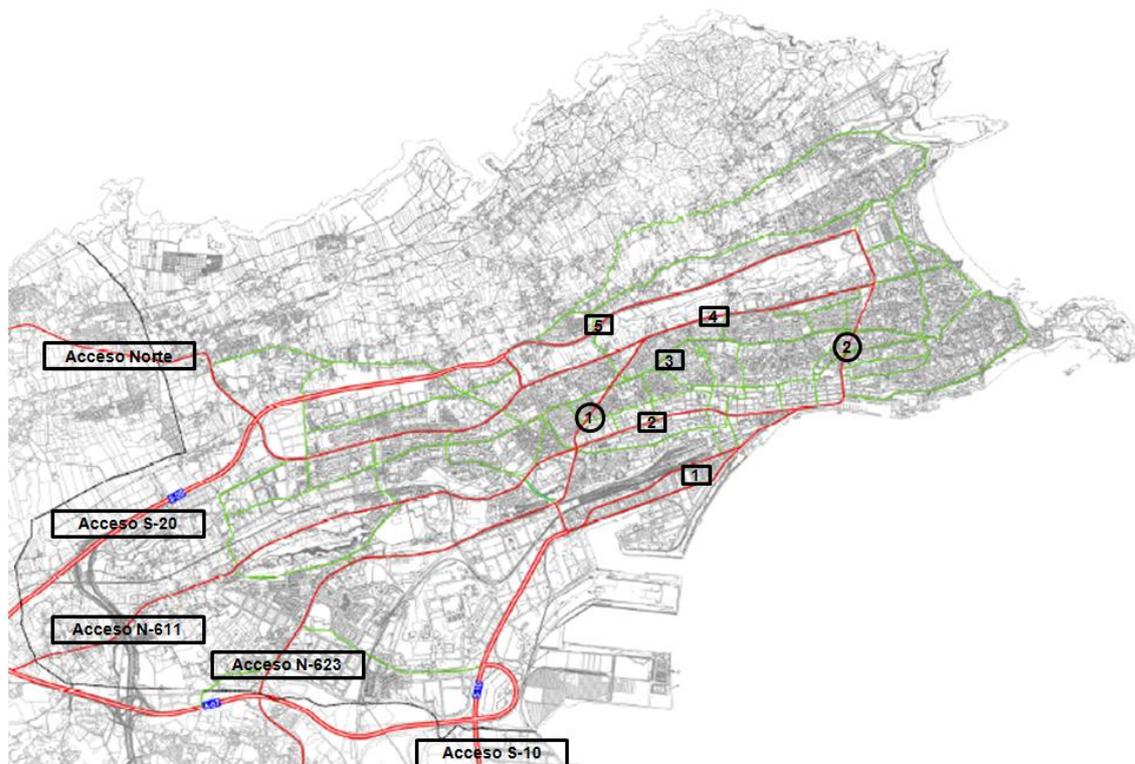


Fig. 19.7.- Sistema de viario y accesos.

19.2.3. TRÁFICO.

La ciudad cuenta con un sistema de 200 espiras repartidas principalmente en los ejes longitudinales y transversales comentados anteriormente. Dichas espiras realizan un registro de aforo y ocupación cada 15 minutos, todos los días del año.

El análisis realizado de todas ellas permite obtener un perfil de distribución temporal de flujo medio en la red vial urbana como el mostrado en la figura 19.7.

En esta figura puede apreciarse tres períodos punta, siendo los más significativos el comprendido entre las 14:00 y las 15:00 horas y entre las 19:00 y las 21:00 horas, ambos periodos con flujos similares.



Fig. 19.8.- Perfil de tráfico en Santander para día medio laborable.

Sin embargo, representan los flujos en las espiras de entrada a la ciudad, y disgregando por tipología de día, se obtienen perfiles con algunas diferencias, siendo la principal que la hora punta es más marcada al mediodía que en el caso anterior.

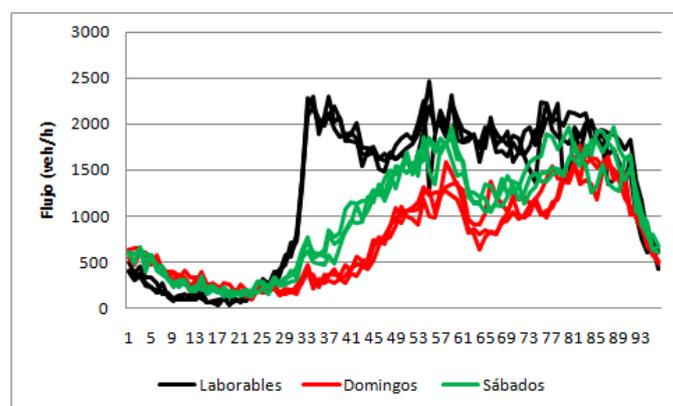


Fig. 19.9.- Perfil de tráfico por tipo de día.

19.2.4. SITUACIÓN ACTUAL DEL TRANSPORTE PÚBLICO.

Actualmente, el transporte público urbano en Santander está administrado por el Ayuntamiento de la ciudad a través de la empresa pública: *Transportes Urbanos de Santander (TUS)*. El sistema se basa en una red de servicios de transporte en autobús, compuesto por 15 líneas, de las cuales 3 son circulares en ambos sentidos. Las líneas y sus características se muestran en la tabla 19.1:

Tabla 19.1.- Líneas del TUS.

	Línea	Intervalo (minutos)	Tiempo ciclo (minutos)	buses	Km/ciclo	Km en hora	vel com
1	Alisal-Valdenoja	16	100	9	26.57	99.64	15.94
2	Corbán-Valdenoja	16	110	8	25.96	97.35	14.16
3	Peñacastillo-UC (túnel)	20	70	4	20.64	61.91	17.69
4	B° Pesquero-Piquío-UC	16	70	4	17.16	64.36	14.71
5c1	Miranda-Plaza Remedios	11	45	5	7.71	42.04	10.28
5c2	Miranda-Gral. Dávila	11	45	4	8.47	46.22	11.30
6c1	Complejo-Avda. Cantabria (túnel)	30	52	2	14.99	29.97	17.29
6c2	Complejo-Puertochico (túnel)	30	52	2	15.17	30.34	17.51
7c1	Manuel Llano-Avda. Los Castros	16	50	4	13.05	48.93	15.66
7c2	Joaquín Bustamante-Puertochico	16	52	3	12.85	48.18	14.82
11	Valdecilla-C/Alta	30	20	1	4.34	8.68	13.03
12	Carrefour-Canaleja	30	85	3	21.37	42.74	15.08
13	Lluja-Cueto	30	110	4	30.45	60.90	16.61
14	Estaciones-Residencia	23	50	2	9.99	26.06	11.99
16	Plaza Remedios-Vía Cornelia	15	27	2	5.56	22.22	12.35
17	Estaciones-Corbán	30	55	2	15.79	31.59	17.23
18	Monte-Puertochico	30	52	2	0.00	0.00	0.00
19	Montaña-Estaciones	30	50	2	17.99	35.99	21.59

El precio de la tarifa es único para cualquier distancia de viaje y el sistema de pago se articula en:

- Billete ordinario: 1.10 €.
- Bono-bus de cartón de 10 viajes: 0.60 €/viaje.
- Tarjeta Chip de contacto: 0.60 €/viaje.
- Tarjeta Chip sin contacto: 0.60 €/viaje

Además, existen tarifas especiales para jubilados y ciertos tipos de pases, como la beca de transporte para estudiantes universitarios residentes en Santander, familias numerosas, etc.

Siguiendo el desarrollo longitudinal de la ciudad, la gran mayoría de las líneas discurren de Este a Oeste, conectando las zonas residenciales con el centro económico y comercial, donde, a su vez, también residen un número elevado de habitantes. Por ello la gran mayoría discurre por el eje central y principal de la ciudad. En concreto son las líneas 1, 2, 3, 4, 5c2, 6c2, 7c2, 12, 13, 17 y 18.

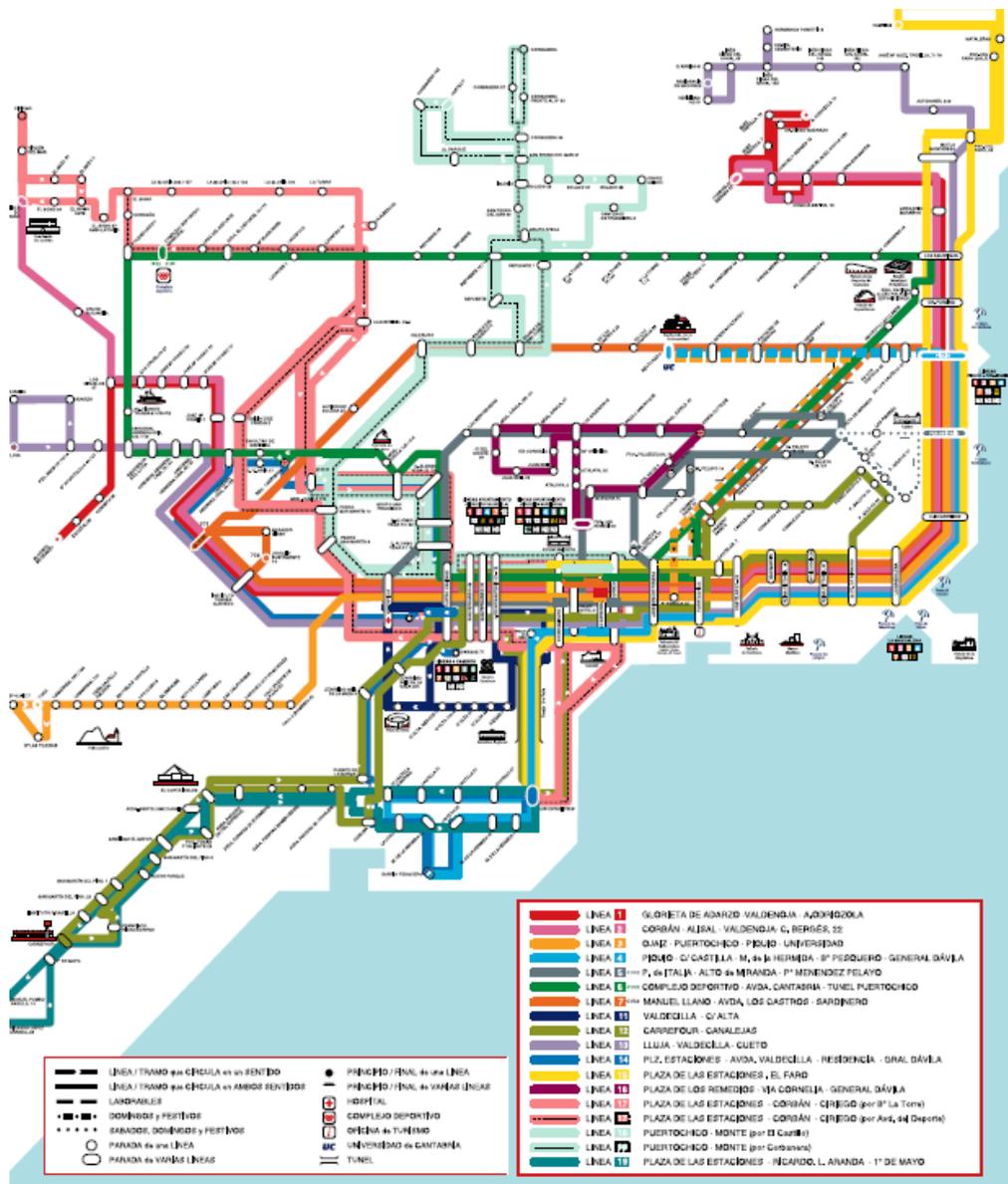


Fig. 19.10.- Esquema de la red del TUS (fuente: TUS).



Según datos de 2009 facilitados por el TUS, el transporte público urbano en Santander fue utilizado por 17.500.000 viajeros en ese año, en la hora punta media de un día laborable se realizan cerca de 5000 viajes y las líneas 1 y 2 fueron las más demandadas con más de 2 millones de pasajeros anuales cada una.

Aunque 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. Solamente una señalización en la parte trasera de los mismos recomienda la cesión del paso de los vehículos a los autobuses para facilitar su incorporación al tráfico después de una parada segregada.

19.3. MODELO DE RED.

Ibeas et al. (2007) desarrollaron el “Modelo de Movilidad de la ciudad de Santander”. Dicho modelo tenía por objetivo la obtención de las matrices O/D en cada modo de transporte y en varios periodos horarios, calibrando un modelo de reparto modal (logit mixto).

La obtención de las matrices se basó en encuestas domiciliarias, cordón y en transporte público, así como aforos de vehículos privados y sube/baja de pasajeros de transporte público en las paradas.

Para ello, se estableció una zonificación de 112 zonas, de acuerdo a la distribución censal, actividades y/o usos del suelo específicos.

Para la aplicación de los modelos se necesita una representación en forma de grafo compuesto por arcos de transporte y nodos. Dichas representación se muestra en la figura 19.10.

Cada arco de la red vial debe estar asociado a un tiempo a flujo libre, estimado mediante pasadas con vehículo flotante, capacidad, siguiendo el HCM, 2000 y la función BPR correspondiente a cada tipología de vial, obtenida del estudio de Ibeas et al., (2007).

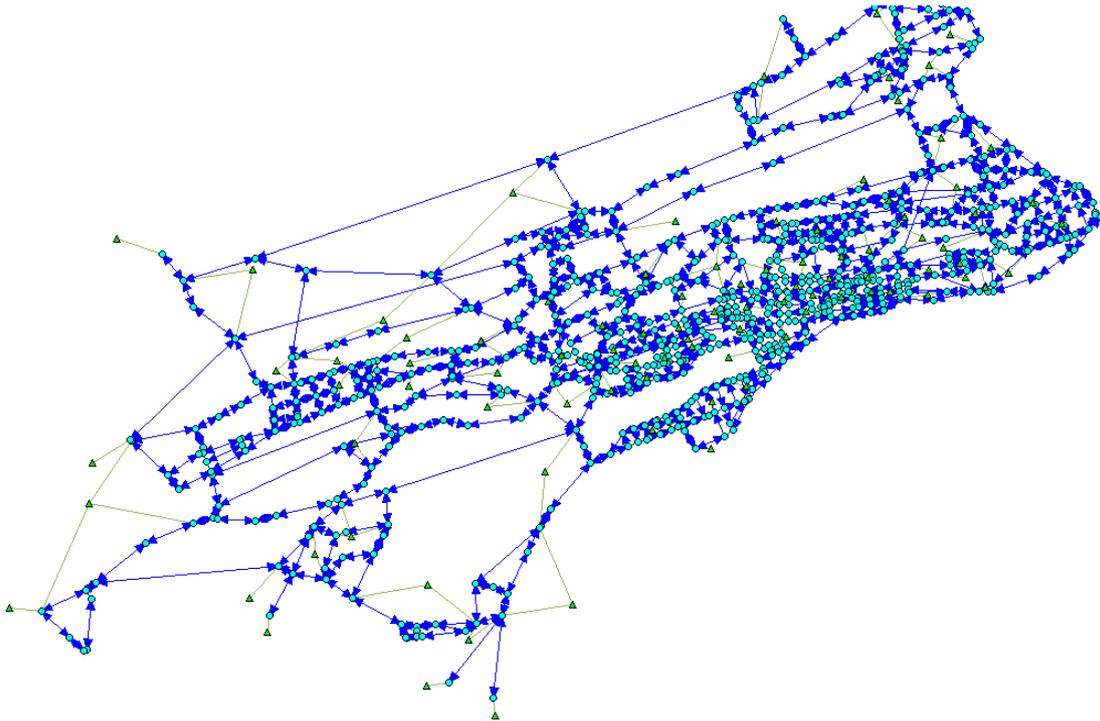


Fig. 19.11.- Red vial en ESTRAUS de la ciudad de Santander.

Por otra parte, las líneas de transporte público deben estar representadas en esta red, por lo que deberá codificarse su recorrido, especificando tamaño de buses, intervalos y tarifas.

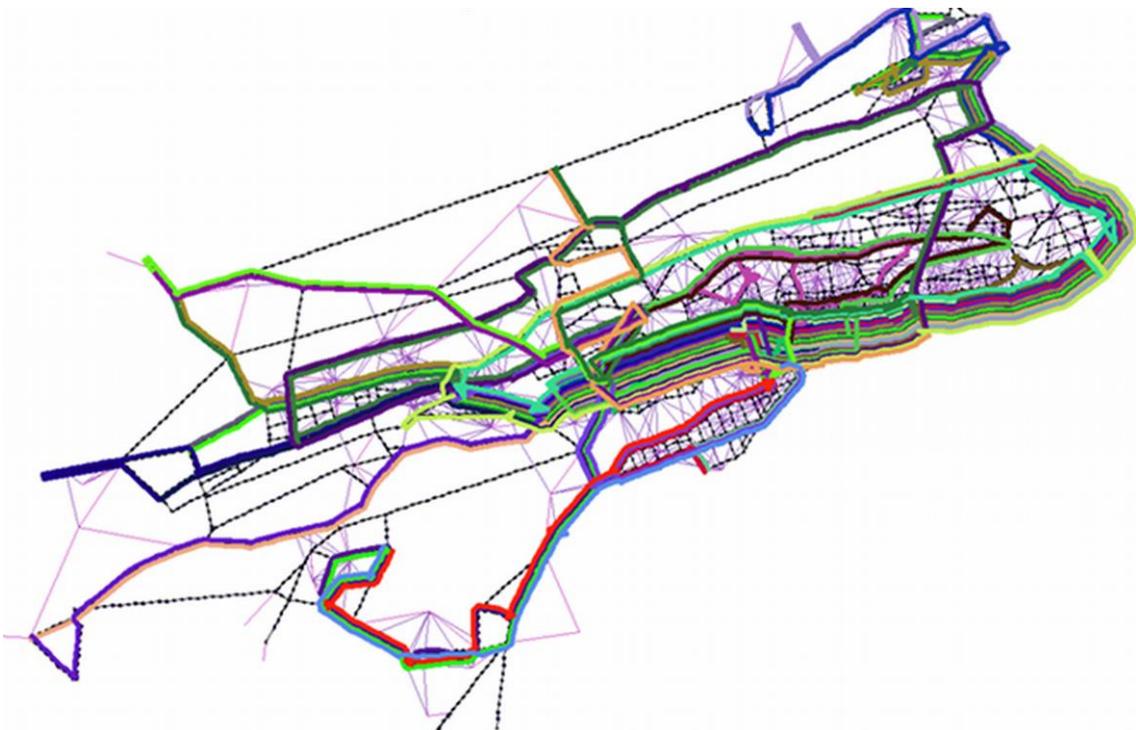


Fig. 19.12.- Líneas TUS codificadas en la red ESTRAUS de Santander.

Capítulo 20

***UBICACIÓN DE PARADAS DE BUS A NIVEL
ESTRATÉGICO: APLICACIÓN DEL MODELO
MACROSCÓPICO***



CAPÍTULO 20. UBICACIÓN DE PARADAS DE BUS A NIVEL ESTRATÉGICO: APLICACIÓN DEL MODELO MACROSCÓPICO.

20.1. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO MACROSCÓPICO DE SANTANDER.

Tal y como se ha expuesto en el capítulo anterior, el primer paso a realizar será la calibración y validación de la situación actual.

Para ello se han tomado las funciones flujo-demora (del tipo BPR) de los arcos de la red vial según su tipología de Ibeas et al. (2007). Se han analizado aquellos arcos de la red principal en los que están permitidos los estacionamientos en superficie (figura 20.1) aplicando la reducción de capacidad correspondiente y las nuevas curvas flujo-demora siguiendo la metodología descrita en el Capítulo 12.

Con todas las nuevas funciones de demora en arcos, elementos de control y paradas, se aplicará el modelo de partición modal (Ibeas et al., 2007) obteniendo las matrices de Transporte Público y Privado, que serán reasignadas para comprobar que los resultados no han variado significativamente con respecto a las mediciones realizadas de flujo en arco y en líneas.

Se ha asignado la matriz de transporte privado a la red (figura 20.2) comparando la asignación con los aforos de validación (figura 20.3), obteniendo un R^2 de 0.87, lo que refleja un buen ajuste.

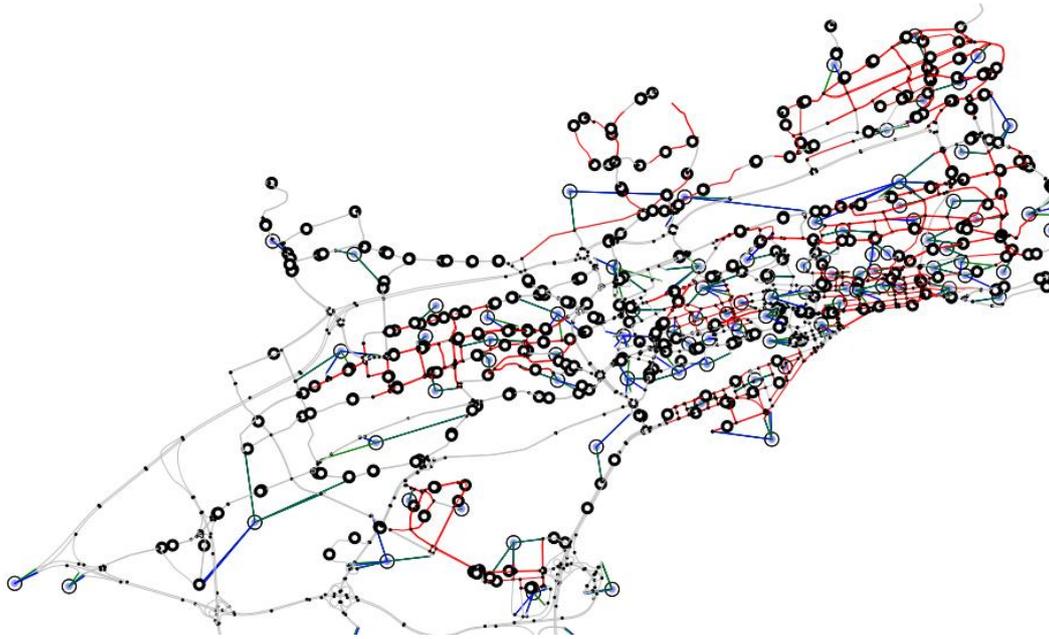


Fig. 20.1.- Arcos con estacionamientos

Finalmente, se ha hecho lo propio con la matriz de transporte público, comparando los viajeros asignados a cada línea con los facilitados por TUS, los tiempos de ciclo de cada línea y sus velocidades comerciales.

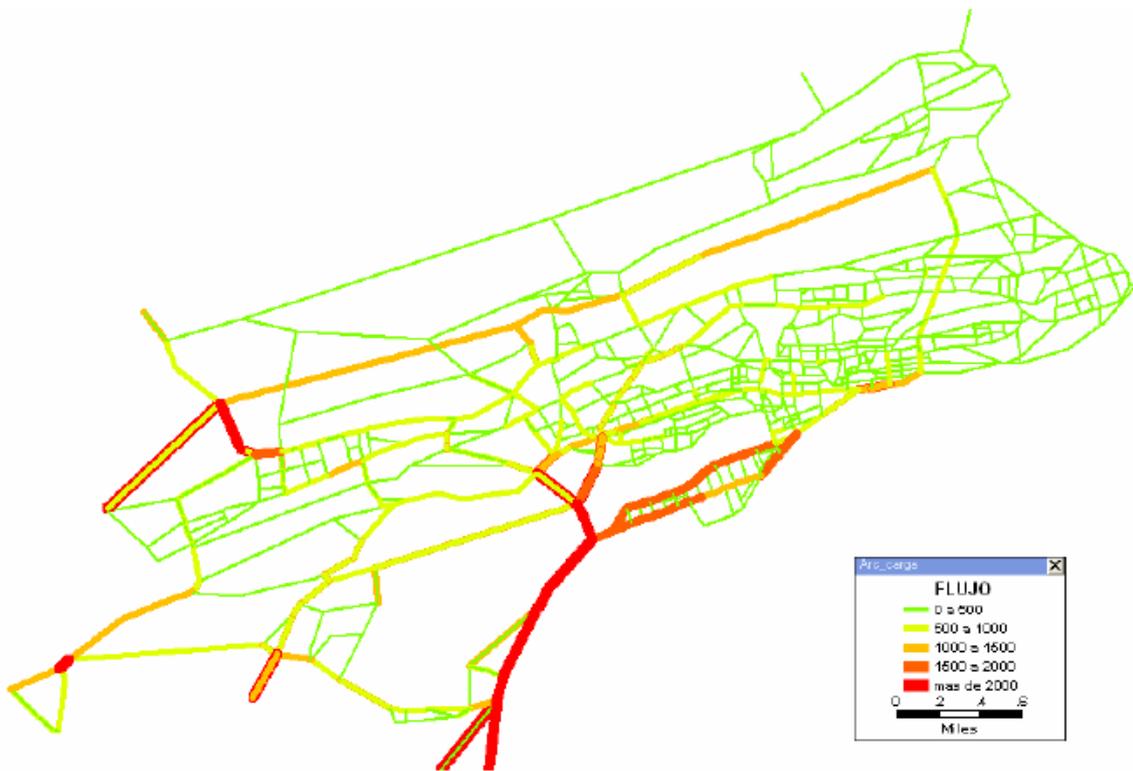


Fig. 20.2.- Asignación de tráfico privado en Santander.

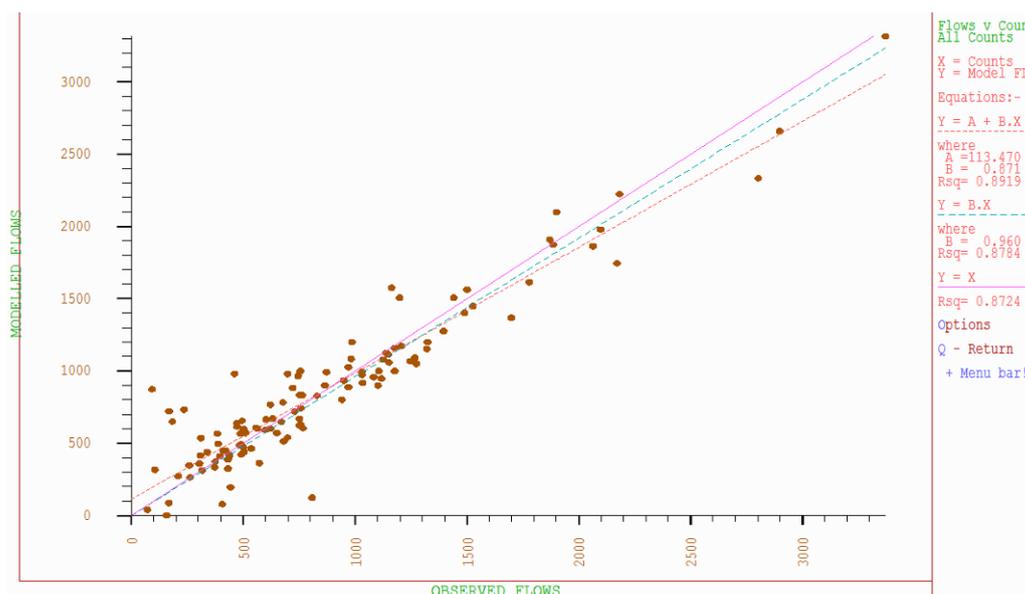


Fig. 20.3.- Ajuste entre flujos asignados y medidos.

Tabla 20.1.- Ajuste para el TUS.

Viajes (hora punta)		Velocidad comercial (km/h)(incluye pausas en cabecera)	
Real	Sim.	Real	Sim.
4944	4939	11.88	11.92

20.2. APLICACIÓN.

El primer paso consistirá en discretizar la red en segmentos 60 metros de longitud para afinar lo máximo posible la ubicación de cada parada (figura 20.4). Esta longitud de segmentos viene dada por las restricciones del software en cuanto a número de arcos y nodos. Con esta discretización, la red de la ciudad queda compuesta por 2589 nodos, 4934 arcos y 7744 pares O-D.

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 (figura 20.5) 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 ($\hat{\sigma}^0$): (240, 300, 360, 360, 840).



Fig. 20.4.- Discretización de la red ESTRAUS de Santander.

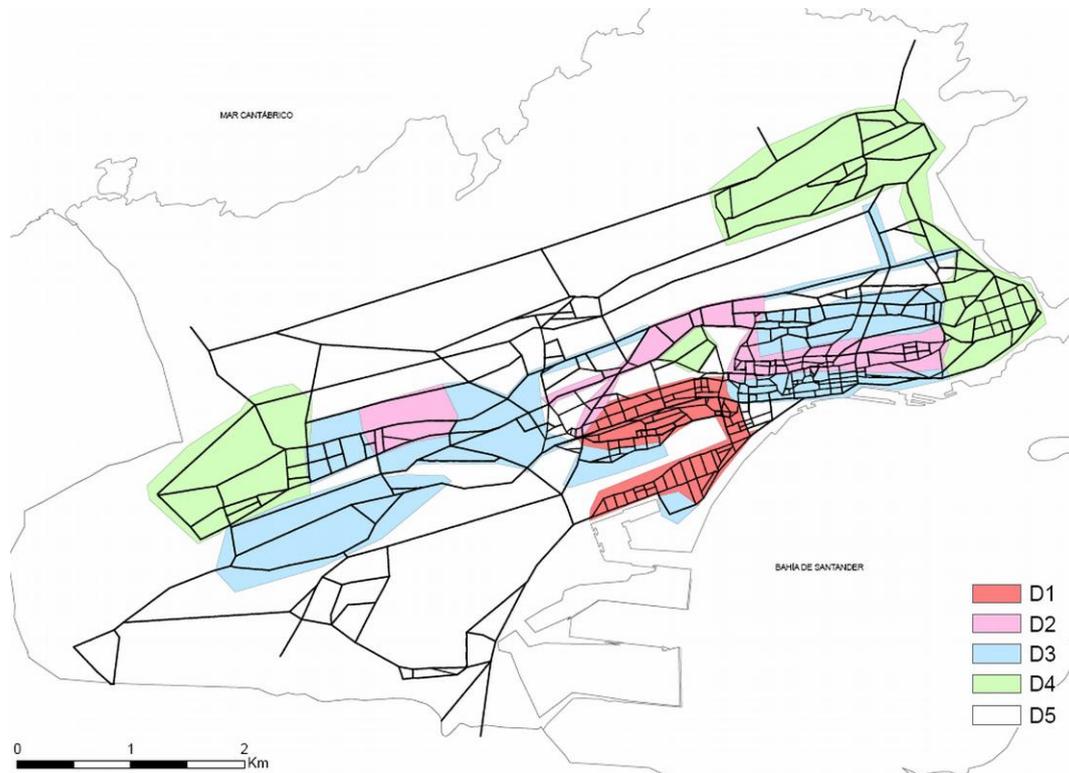


Fig. 20.5.- Zonas de igual distanciamiento.



El coste de construcción de las paradas de autobús se suprimió del modelo puesto que éste era sufragado por la empresa concesionaria de la explotación publicitaria de las mismas. Los costes unitarios de rodadura, de personal y fijos se calcularon teniendo en cuenta los datos facilitados por el TUS (Transportes Urbanos de Santander), que es la empresa operadora.

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 (Ibeas et al., 2008) (tabla 20.2).

Dada la actual ubicación de paradas en la ciudad, se obtiene el distanciamiento medio en cada zona, siendo éste el vector inicial de partida del algoritmo.

Con este vector ya se puede ejecutar el algoritmo de solución.

El resultado final fue obtenido tras 32 iteraciones y algo más de 35 minutos de tiempo de ejecución (Pentium Dual Core 2.4 Ghz, 4 Gb RAM).

Tabla 20.2.- Valores del tiempo y costes unitarios utilizados.

Variable	Valor
Tiempo viaje (BUS)	26.43 €/h
Tiempo espera (BUS)	51.29 €/h
Access time (BUS)	31.01 €/h
Transfer time (BUS)	79.77 €/h
Tiempo viaje (Coche)	28.90 €/h
CK	0.4 €/km
CP	14 €/bus
CF	32 €/bus
CR	0.02 €/h

Los resultados obtenidos se detallan en la tabla 20.3, 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

umentado la velocidad comercial y se ha conseguido un ligero aumento de los usuarios del transporte público.

Tabla 20.3.- Resultados de la aplicación a Santander- Comparativa entre la situación actual y la optimizada.

	D (m)	Nº marquesinas y paradas bus()	Pasajeros	Flota (buses)	Velocidad comercial BUS (km/h)
Situación inicial	240, 300, 360, 360, 780	295 (171)	4944	63	11.88
Situación optimizada	360, 420, 540, 420, 780	264 (153)	5109	61	13.07

19.1. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

Una vez obtenidos los resultados de la aplicación a un caso real, se ha estudiado la influencia que tiene sobre el resultado final el hecho de considerar distintos niveles de agregación, criterios de zonificación, variaciones en el nivel de demanda y distintas restricciones operacionales.

En primer lugar se analizará la influencia de la solución inicial factible de partida del algoritmo en la solución final y en el tiempo de ejecución sin ningún tipo de restricciones.

Para ello se han utilizado los espaciamientos de partida definidos en la tabla 20.4, cada uno de ellos obedeciendo a diferentes criterios de agregación zonal y siguiendo con el criterio de 5 tipos de zonas (5 componentes del vector de espaciamiento). De cada caso se ha hecho un seguimiento de las diferentes iteraciones hasta llegar al óptimo.



Fig. 20.6.- Ubicación de paradas actual (arriba) y optimizada.

En dicho seguimiento, se ha detectado que, a medida que la solución inicial es más extrema (casos A e I), el algoritmo Hooke-Jeeves básico es más propenso a quedarse en un óptimo local. Esto es lo que muestra en la figura 20.7, donde se puede ver que el algoritmo para en diferentes valores del Coste Social para distinto número de paradas.



Tabla 20.4.- Soluciones iniciales analizadas y zonificaciones empleadas.

Vector	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)	D4 (m)	D5 (m)	Criterio
A	120	120	120	120	120	Ninguno
B	720	720	720	720	720	Ninguno
C	240	300	540	540	900	Densidad y Comercio
D	360	360	600	600	840	Tasa Motorización
E	420	420	420	420	420	Ninguno
F	240	360	360	360	720	Población
G	240	420	540	540	840	Densidad y Comercio
H	300	300	300	300	300	Ninguno
I	1200	1200	1200	1200	1200	Ninguno
J	180	180	180	180	180	Ninguno
K	240	240	240	240	240	Ninguno
L	120	180	180	180	360	Población
SANTANDER	240	300	360	360	780	Densidad y Comercio

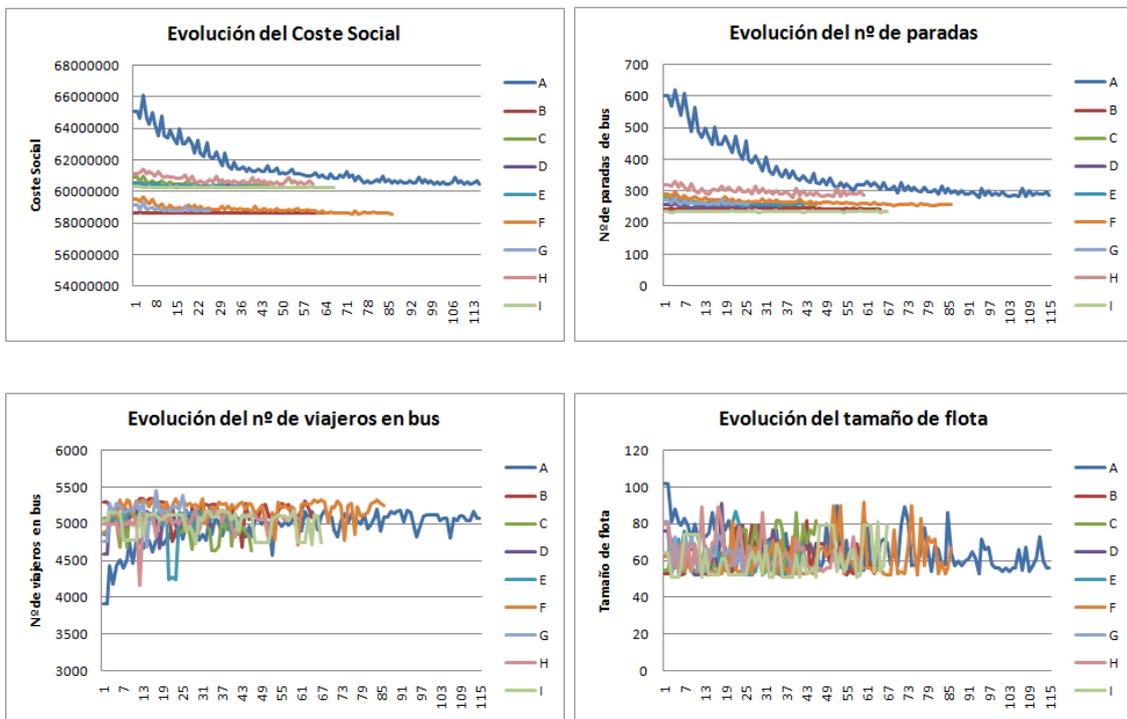


Fig. 20.7.- Evolución de algunas variables utilizando Hooke-Jeeves.

Una pequeña modificación del criterio de salto y parada en el algoritmo permite reducir el número de óptimos locales, con lo que se va consiguiendo progresivamente la convergencia para prácticamente cualquier solución inicial. Esta convergencia se obtiene igualmente aplicando el algoritmo Tabú, evitando en mayor medida lo óptimos locales que con Hooke-Jeeves. De hecho, el algoritmo Hooke-Jeeves modificado en el salto y en el criterio de parada presenta reportar soluciones prácticamente idénticas en un número de iteraciones muy similares al Tabu Search (figura 20.8).

Se ha detectado además que el criterio de zonificación en un área urbana no es determinante en cuanto a su escasa influencia en la solución final, si bien influye en la rapidez de convergencia del modelo ya que según el criterio elegido, la solución inicial factible es también distinta.

Por lo tanto, como era de esperar, la variable de mayor impacto a la hora de rapidez de convergencia, es la solución inicial o vector de distancias inicial. En los casos estudiados, una zonificación mixta establecida en base a densidad de población y actividad comercial converge con mayor rapidez que la realizada tomando como criterio el número de habitantes por zona o la tasa de motorización, por ejemplo, tal y como puede verse en la figura 20.8).

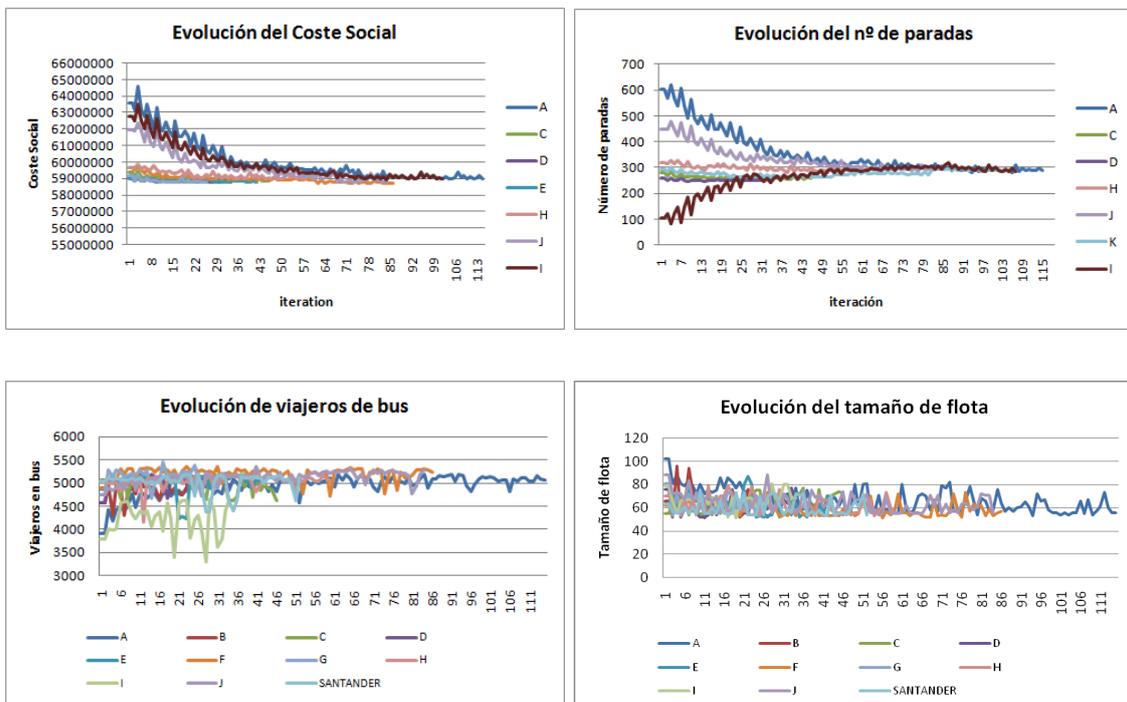


Fig. 20.8.- Evolución de algunas variables utilizando Tabu Search.

A lo largo de las iteraciones, el propio modelo se va ajustando creando sus propias agregaciones zonales de equidistancia de paradas, llegando a zonificaciones muy similares independientemente de los datos de partida. Esto se muestra en la figura 20.9, donde, para la zonificación inicial realizada en base a población, las sucesivas iteraciones van alcanzando la solución final similar a la obtenida en base a densidad de población y actividad, que ha sido la utilizada en el apartado de aplicación.

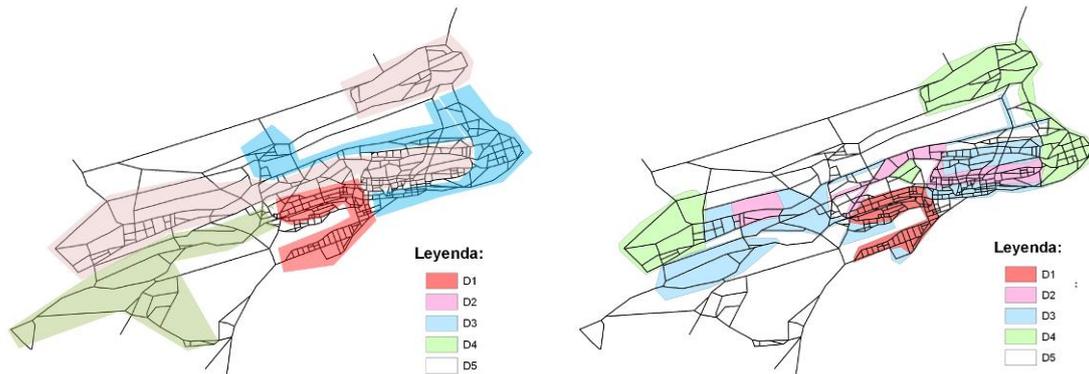


Fig. 20.9.- Comparativa de Zonificación inicial en base a población y densidad-actividad.

En la figura 20.10 se representa la variación de coste social en función del número de paradas. En esta figura se aprecia una fuerte sensibilidad del coste social a la ubicación de paradas, guardando relación con los viajeros del sistema de transporte público (figura 20.11).

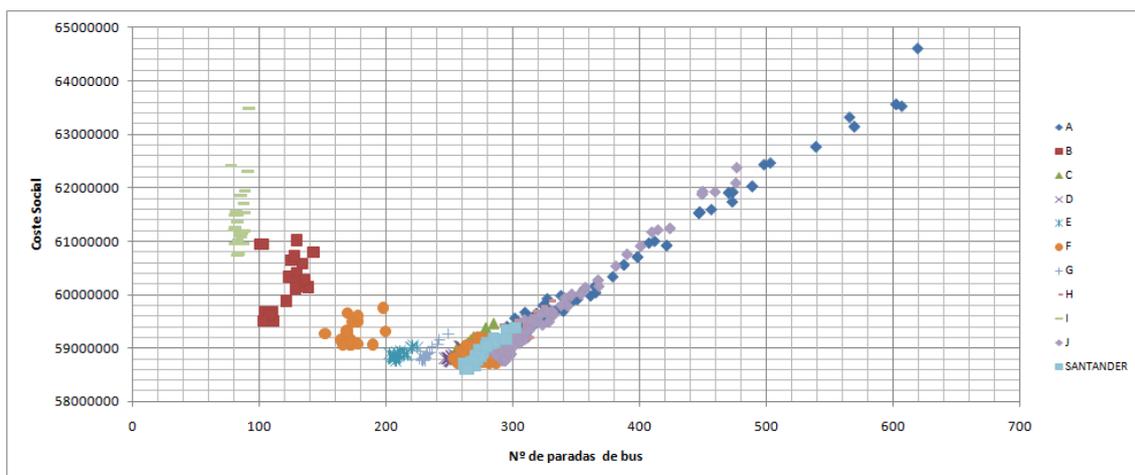


Fig. 20.10.- Variación del coste social con el número de paradas.

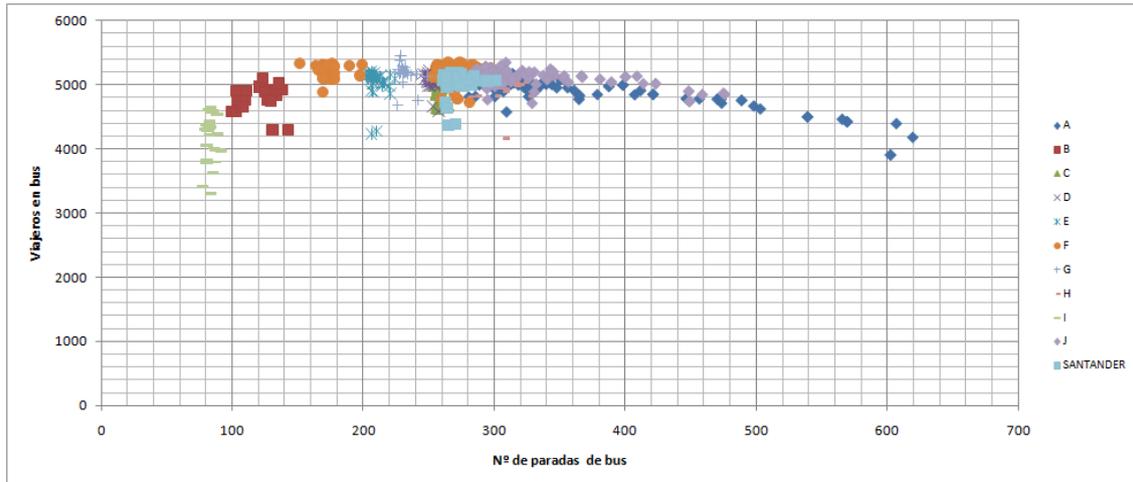


Fig. 20.11.- Variación de viajeros en bus con el número de paradas.

De esta forma, 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. Durante el proceso de optimización en la ubicación de paradas, se reduce el número total de las mismas, consiguiendo incrementar la demanda de transporte público, disminuyendo tanto el coste social total. En la medida que el número de paradas disminuye, aumenta la importancia de su ubicación y distribución. Así, 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.

Sin embargo, cuando la densidad de paradas sigue bajando la distancia de acceso se va haciendo mayor y llega un momento en que el sistema pierde viajeros progresivamente hasta el mínimo posible de número de paradas por restricciones de cabeceras, puntos fijos, etc.).

Analizando ahora el tamaño de flota, puede apreciarse que para densidades altas de paradas, los tiempos de ciclo aumentan y, por lo tanto, se requiere un mayor número de buses para satisfacer las frecuencias iniciales. Obviamente, a medida que la densidad va disminuyendo, el número de detenciones disminuye a la vez que el tiempo de ciclo, por lo que la flota necesaria también es menor. Sin embargo, a medida que las paradas van disminuyendo, el tamaño de flota requerido no se reduce, como pudiera esperarse, sino que puede aumentar (figura 20.12). Esto es debido a que el número de viajeros en

transporte público se reduce, lo que, según el nivel de demanda de la red, provoca que aumente la congestión del tráfico, repercutiendo directamente en el tamaño de flota necesario para mantener las frecuencias.

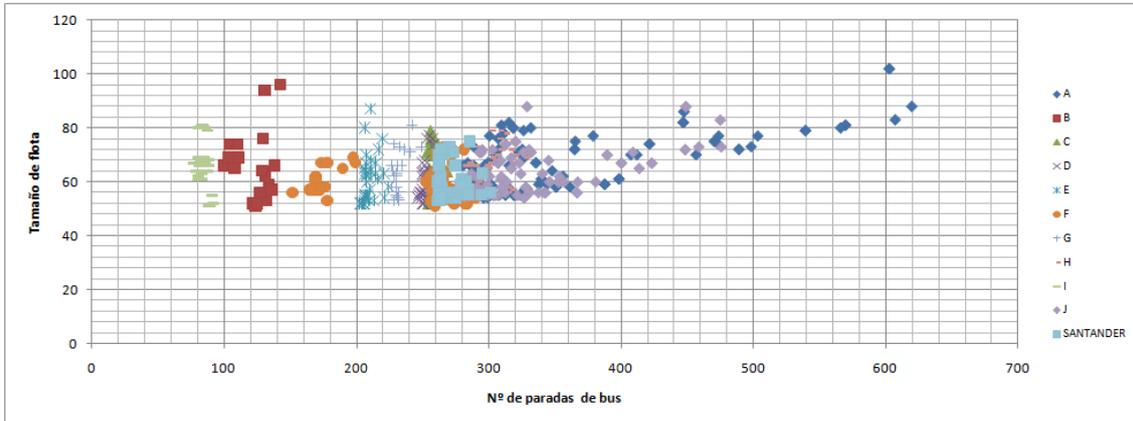


Fig. 20.12.- Variación del tamaño de flota con el número de paradas.

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. El número de iteraciones hasta convergencia depende de lo ya comentado anteriormente sobre las características y valores de los vectores de partida.

Estos resultados no podrían haberse obtenido suponiendo una demanda fija y conocida (mediante una Matriz O/D de Transporte Público) debido a la no consideración de los cambios en la demanda y la congestión, y sus efectos sobre el tamaño de flota requerido para mantener las frecuencias.

Otra variable que se ha analizado en cuanto a su influencia en la solución final ha sido el nivel de demanda de la red. Así, se ha partido con una demanda muy baja (la mitad de la demanda actual de Santander), y se ha aumentado progresivamente multiplicando la matriz de Santander por 0.75, 1 (el caso de Santander), 1.5 y 2.

Para cada matriz se ha partido de varios vectores de espaciamiento iniciales, partiendo de casos muy extremos y con la configuración inicial de Santander, analizándose la evolución de las variables del modelo y su interrelación.

Así, en las tablas 20.5 y 20.6 se representa la solución final dada para cada nivel de demanda:

Tabla 20.5.- Resultados finales para distintos niveles de demanda.

Matriz	Z	C _{bus}	C _{coche}	C _{oper}	Distanciamiento					Nº paradas	Viajes bus
0.5	165267	39553	123560	2154	1800	1740	1800	1860	1800	68	1580
0.75	316517	52154	261952	2411	1200	1200	1200	1200	1200	84	2351
1(Santander)	707318	80805	622659	3854	360	420	540	420	780	153	5109
1.5	1374611	2859	1366816	4936	360	420	480	420	420	166	10240
2	2462995	135216	2418825	8954	360	360	360	420	360	184	12281

Tabla 20.6.- Resultados finales para distintos niveles de demanda.

Matriz	C _{bus} /pax	C _{coche} /pax	Z/pax	Ganancia Operador	Flota
0.5	12.51	2.43	3.06	58.7	35
0.75	13.31	4.12	4.69	331.6	40
1(Santander)	9.95	8.54	8.73	1825.8	61
1.5	10.27	16.23	14.55	2232	89
2	11.01	25.28	22.81	-357.3	167

En estas tablas se puede apreciar que para niveles de demanda muy bajos (casos 0.5 y 0.75), las paradas puedan estar muy espaciadas entre sí y de manera uniforme en la ciudad, aproximadamente cada 1200-1600 metros. Esto indica que la pérdida de viajeros del bus que se pasan al vehículo privado no produce congestión en la red (ya que la demanda global es muy baja) y, por lo tanto, el coste social se ve compensado con los ahorros del operador, al requerir menos flota para explotar el servicio (es importante recordar que las frecuencias se mantienen constantes en el problema). Sin embargo, a medida que aumenta la demanda, la accesibilidad al transporte público debe ser mayor, disminuyendo el espaciamiento hasta los 360 metros, siendo la distribución de paradas también homogénea en estos casos de demanda muy alta.

Estos resultados pueden comprenderse mejor si se representa la evolución de cada variable para cada configuración de paradas y nivel de demanda. La leyenda utilizada en las gráficas es la siguiente: ■ 1 ◆ 0.5 ▲ 2 ✕ 1.5 ✱ 0.75

Así, si se observa la figura 20.13 se puede ver la evolución del Coste Social (Z) y del número de viajeros en bus. En ambas gráficas puede observarse que, la sensibilidad del valor del coste social con el número de paradas aumenta a medida que lo hace el nivel

de demanda y la congestión. Lo mismo sucede con el número de viajeros en el sistema de transporte público. En todos los casos, a medida que se reduce la accesibilidad, disminuye el número de viajeros, incrementándose a medida que la densidad de paradas aumenta, llegando un momento en el que un exceso de número de paradas produce una disminución de viajeros debido al incremento de los tiempos de viaje en el bus. También se aprecia una mayor sensibilidad de viajeros en bus para espaciamientos entre paradas altos.

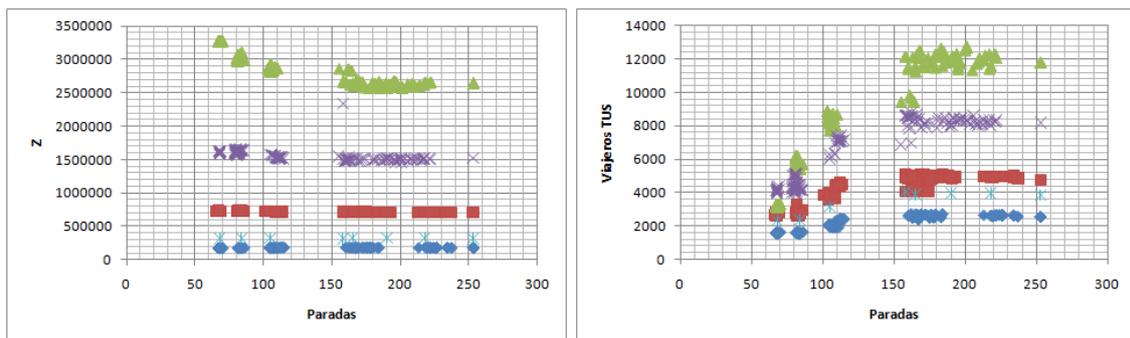


Fig. 20.13.- Relación Coste Social y viajeros en bus con el número de paradas para distintos niveles de demanda.

De la figura anterior se desprende una relación entre viajes en transporte público y Coste Social, especialmente para demandas altas. Esto se ve corroborado con la siguiente figura (figura 20.14), donde, a medida que aumenta el nivel de demanda, aumenta la importancia del transporte público en el coste social total.

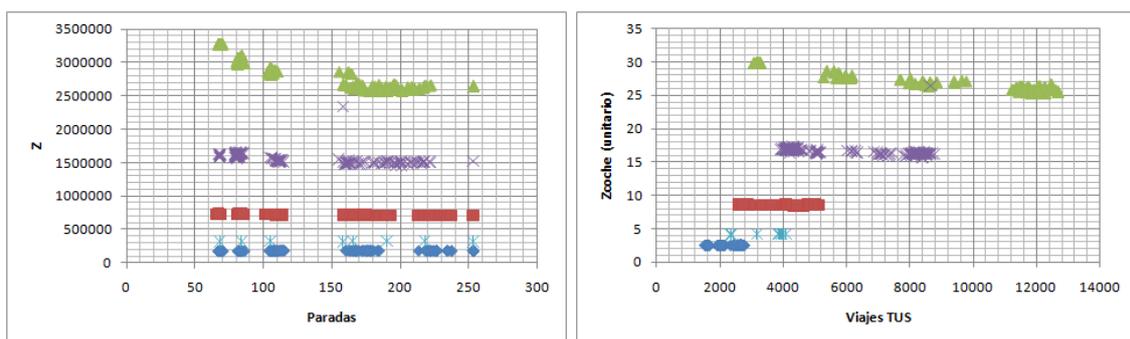


Fig. 20.14.- Relación Coste Social-viajeros en bus y Coste de usuarios de coche-viajeros en bus para distintos niveles de demanda.

Es decir, para demandas altas, cualquier ganancia de viajeros de transporte público que pueda producir una disminución de la congestión será beneficiosa para toda la red, como se muestra en la gráfica de la derecha donde los usuarios del coche se ven beneficiados por el aumento este aumento viajeros, ya que su coste unitario disminuye.

El nivel de demanda y el espaciamiento entre paradas también influyen, como es lógico, en el operador de transporte público. Así, a mayor número de paradas, mayor será el tiempo de ciclo de los buses, y, teóricamente, si se quisiera mantener un intervalo dado, mayor será el número de flota requerido. Según el número de paradas va disminuyendo, la flota requerida es menor. Sin embargo, dependiendo del nivel de demanda, el grado de congestión de la red, agravado por la pérdida de viajeros, hace que los tiempos de viaje sean incluso mayores que para un mayor número de paradas, provocando necesidades de flota mayores. Asimismo, como era lógico, el beneficio del operador de transporte público se ve incrementado con el número de viajeros, pero a la vez influido por el tamaño de flota necesaria.

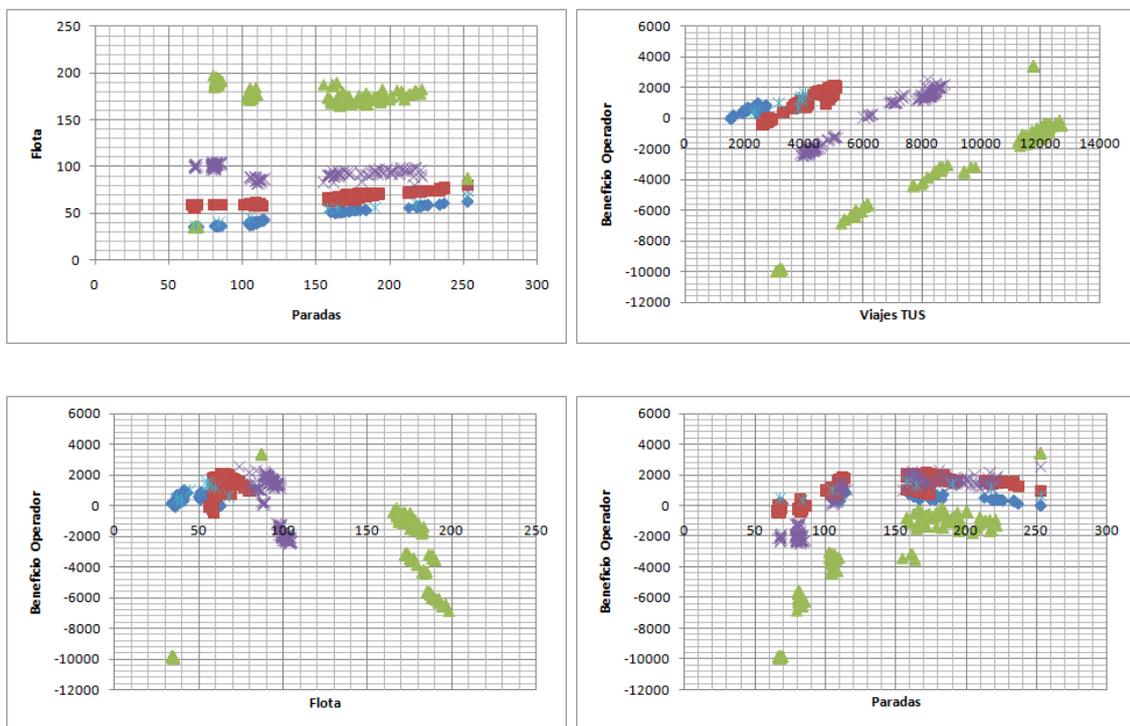


Fig. 20.15.- Variables y costes operacionales para distintos niveles de demanda.

Se pueden obtener más relaciones interesantes entre las variables, como las mostradas en la figura 20.16. En esta figura, la gráfica de la derecha muestra cómo, para demandas bajas, el coste del operador aumenta a medida que aumentan las paradas y, consecuentemente, aumenta el tamaño de flota requerido. Para estos casos, a medida que aumenta el coste del operador, disminuye el del usuario.

Sin embargo, a medida que la demanda, y por lo tanto la congestión, aumentan, esta relación se va invirtiendo llegando a haber una relación directa entre ambos costes. Esto puede dar pie a un análisis de ponderación entre ambos costes según el grado de congestión del problema inicial.

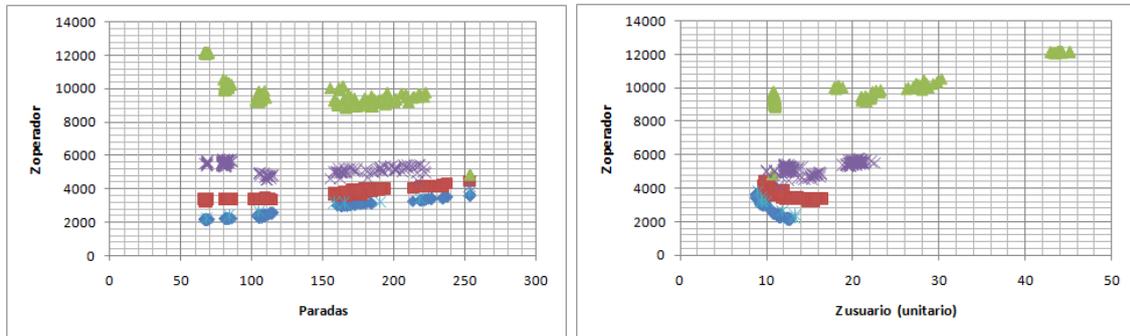


Fig. 20.16.- Costes del operador en función del número de paradas y costes del usuario para distintos niveles de demanda.

Finalmente, se muestran las variaciones de cada coste en función del número de paradas en la red.

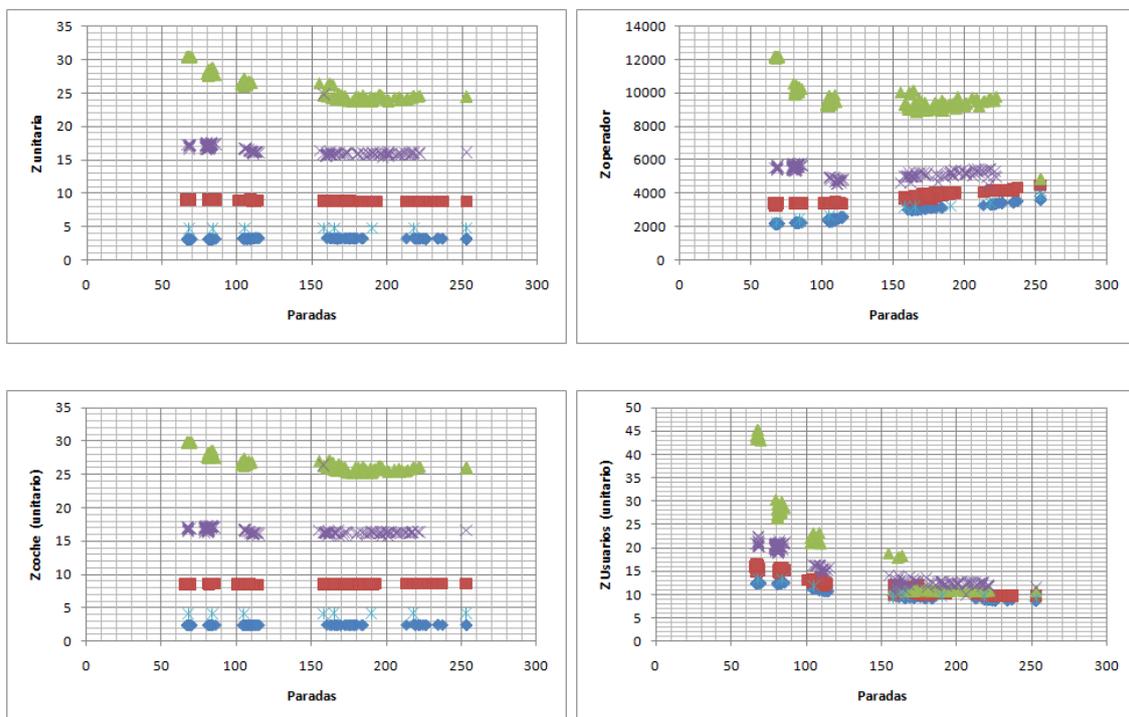


Fig. 20.17.- Componentes de la función de coste en función del número de paradas para distintos niveles de demanda.

Capítulo 21

***UBICACIÓN DE PARADAS DE BUS A NIVEL TÁCTICO:
APLICACIÓN DEL MODELO DE MICROSIMULACIÓN***



CAPÍTULO 21. UBICACIÓN DE PARADAS DE BUS A NIVEL TÁCTICO: APLICACIÓN DEL MODELO DE MICROSIMULACIÓN.

21.1. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO DE MICROSIMULACIÓN DEL EJE DE ESTUDIO.

Una vez que se ha obtenido el resultado final del modelo macroscópico, se deberán volcar los datos en el modelo de microsimulación. Sin embargo, para que eso sea posible, éste debe estar ya con la red codificada y calibrado.

En concreto, la ubicación final de las paradas de bus a nivel micro se realizará para el principal eje de la ciudad, que conecta el hospital Marqués de Valdecilla con Puertochico de aproximadamente 2,5 km de longitud, el cuál es atravesado por 11 líneas del transporte público de la ciudad, conformando un tráfico total de 53 buses/hora y sentido. A su vez, por dicho eje circulan aproximadamente 1500 vehículos/hora punta y sentido. La tipología de la red vial es de dos carriles de 3 metros de anchura media, con capacidades que oscilan entre los 1600 y 1800 vehículos/hora y sentido.

Dicho escenario se codificó en el simulador AIMSUN[®]. Para su calibración se realizaron mediciones en campo para poder modelizar los tres principales submodelos del programa: el modelo de seguimiento de vehículos, el modelo de cambio y permanencia en carril y el modelo de aceptación de gap.

En primer lugar, una vez codificada la red vial, se tomaron datos del centro de control de tráfico sobre los repartos, ciclos y desfases de la red semafórica.

Se ubicaron espiras en el mismo lugar donde actualmente están ubicadas por el centro de control, se midieron el número y duración de las maniobras de estacionamiento y se programó la simulación de estacionamientos en los correspondientes viales.

Las velocidades de recorrido en el vial se han establecido en base a la velocidad real medida de los vehículos, no la legalmente permitida.

La demanda actual de la red se obtiene de la matriz O/D actual, agregada a la zonificación realizada en el eje, y ajustada con aforos en intersecciones y calles secundarias transversales en la hora punta. Se ha prestado especial atención a los 3 aparcamientos subterráneos presentes a lo largo del eje, aforándose las entradas y salidas en los accesos y los tiempos en los controles de acceso.

Los modelos de comportamiento se calibraron mediante mediciones de tiempos de reacción, flujos de descarga en semáforos y grabaciones en vídeo. Estas últimas fueron especialmente útiles para los modelos de cambios de carril ante un giro próximo, y comportamiento ante vehículos mal estacionados o maniobras de aparcamiento.

Finalmente, se registraron los instantes de llegada de los usuarios a las paradas, los tiempos de sube/baja en las paradas de transporte público en función del número de pasajeros, y del SAE se obtuvieron los instantes de entrada de los buses en el eje, así como los sucesivos pasos por parada hasta la salida del mismo.

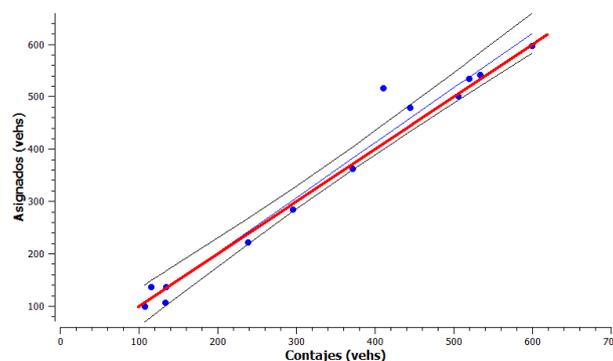


Fig. 21.1.- Ajuste de aforos.

21.2. APLICACIÓN

Los outputs obtenidos del modelo de macrosimulación, aplicado a toda la ciudad, serán los inputs del modelo de microsimulación del eje principal de la ciudad., por lo que, con el modelo ya validado, se ubican las paradas cuya posición final ha sido obtenida a nivel macro. Como ya se ha comentado, estos puntos servirán como guía para construir el escenario de microsimulación. Así, en torno a la posición indicada por el modelo macro se propondrán varias alternativas. En concreto se importan, además de los puntos de parada, la matriz O/D de transporte privado y el sube/baja de cada línea de transporte público en cada parada del eje.

En la figura 21.2 se muestra el detalle de la solución obtenida en el modelo macroscópico para el eje considerado (las paradas son los puntos de color rojo). Dichos puntos serán volcados al modelo de microsimulación (figura 21.3).



Fig. 21.2.- Ubicación inicial de paradas del modelo macroscópico en el eje de estudio.

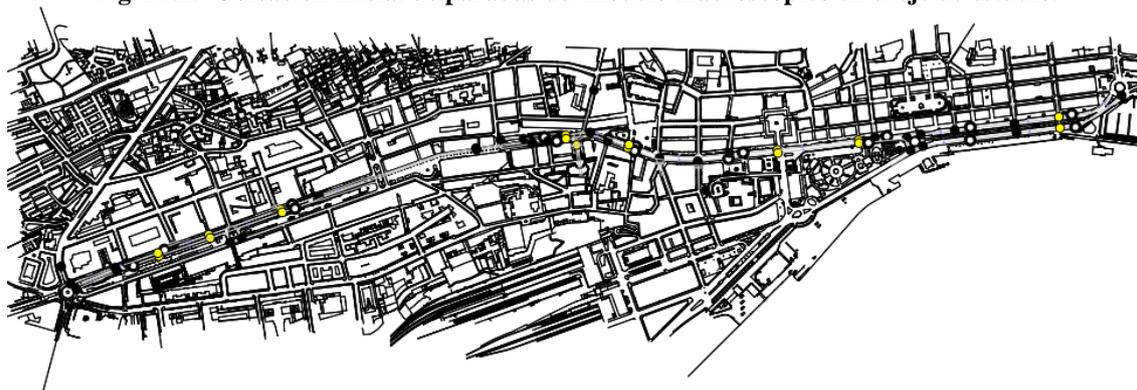


Fig. 21.3.- Codificación del eje de estudio en AIMSUN.

Posteriormente, en función de la tipología y topología de cada parada, se van definiendo todas las alternativas a analizar. Dado que la discretización macroscópica era de 60 metros, se ha creído conveniente trazar un área de 30 metros aguas arriba y aguas debajo de la ubicación inicial propuesta para poder emplazar las posibles alternativas.



De esta forma, en el eje se tienen 7 paradas (P1 a P7), cuyas posibles ubicaciones se muestran en la figura 21.4 (de izda. a dcha. y de arriba a abajo).

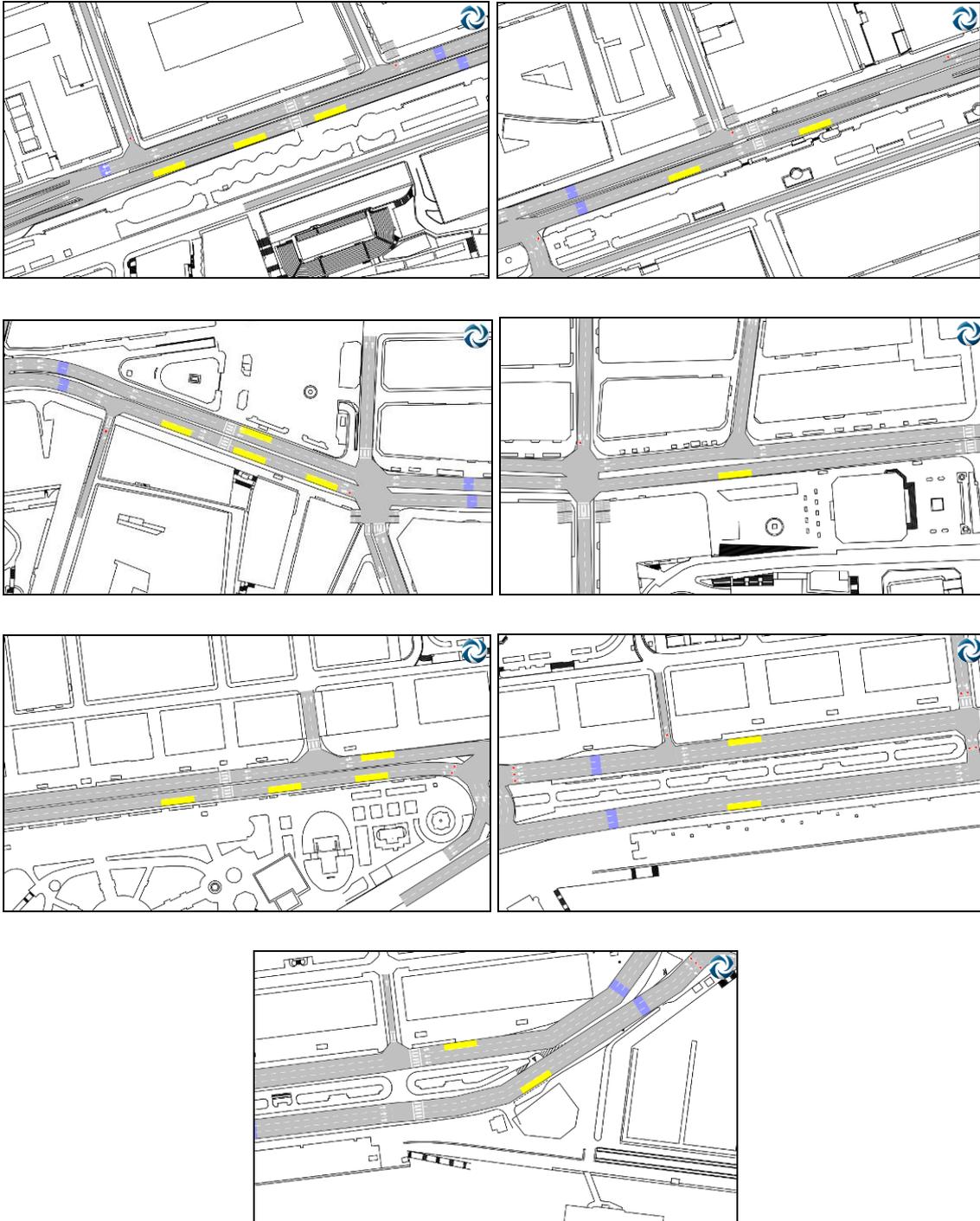


Fig. 21.4.- Alternativas de ubicación a nivel micro para cada parada del eje.

A continuación se describe cada parada y sus alternativas de ubicación:



- P1: Parada de tipo mid-block con semáforo. Se proponen tres alternativas de ubicación: en la línea de detención (1), aguas arriba del semáforo y alejada del mismo (2) y aguas abajo del semáforo (3).
- P2: Parada de tipo mid-block cuya ubicación inicial se encontraba aguas abajo del semáforo a una distancia de 15 metros (1). A pesar de que esta ubicación pudiera ser definitiva, se propone una alternativa aguas arriba del semáforo (2).
- P3: Doble parada con semáforo e intersección. Se plantean las siguientes alternativas de ubicación: aguas arriba y aguas abajo (1), ambas aguas abajo (2), y aguas arriba y aguas abajo más alejadas, estando la segunda parada esté cercana a otro semáforo (3).
- P4: parada de tipo mid-block sin semáforo: ubicación definitiva.
- P5: Parada cercana a una intersección (glorieta) y semáforo. Se plantean alternativas aguas abajo del semáforo (1), aguas arriba del mismo (2) y aguas abajo aunque cerca de la intersección, 20 m. aproximadamente (3).
- P6: parada de tipo mid-block sin semáforo: ubicación definitiva.
- P7: parada de tipo mid-block sin semáforo: ubicación definitiva.

A raíz de estas alternativas se genera un vector \overline{M} de 7 componentes, uno por parada, donde las paradas 4, 6 y 7 ya presentan una ubicación definitiva. Cada componente de este vector, excepto los dos ya especificados, tendrá dos o tres posibles valores, cada uno de ellos asociado con una ubicación final, tomando valor de 1 a 2 o de 1 a 3 siguiendo el sentido de la marcha, de manera análoga al ejemplo de aplicación al del capítulo 18.

Las diferentes combinaciones de ubicación final dan lugar a 72 posibles vectores. La MACRO diseñada (ver Anexo III), se encarga de variar el vector \overline{M} y ejecutar 10 simulaciones de cada escenario, generando la media de cada uno y almacenándola en una base de datos ACCESS.

De esta forma se realizaron las 720 simulaciones para cada tipo de llegada de viajeros: uniforme y exponencial.

Tabla 21.1.- Vectores para cada número de iteración.

N	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	2	1	1	1	1	1	1
3	3	1	1	1	1	1	1
4	1	2	1	1	1	1	1
5	2	2	1	1	1	1	1
6	3	2	1	1	1	1	1
7	1	1	2	1	1	1	1
8	2	1	2	1	1	1	1
9	3	1	2	1	1	1	1
10	1	2	2	1	1	1	1
11	2	2	2	1	1	1	1
12	3	2	2	1	1	1	1
13	1	1	1	1	2	1	1
14	2	1	1	1	2	1	1
15	3	1	1	1	2	1	1
16	1	2	1	1	2	1	1
17	2	2	1	1	2	1	1
18	3	2	1	1	2	1	1
19	1	1	2	1	2	1	1
20	2	1	2	1	2	1	1
21	3	1	2	1	2	1	1
22	1	2	2	1	2	1	1
23	2	2	2	1	2	1	1
24	3	2	2	1	2	1	1
25	1	1	1	1	3	1	1
26	2	1	1	1	3	1	1
27	3	1	1	1	3	1	1
28	1	2	1	1	3	1	1
29	2	2	1	1	3	1	1
30	3	2	1	1	3	1	1
31	1	1	2	1	3	1	1
32	2	1	2	1	3	1	1
33	3	1	2	1	3	1	1
34	1	2	2	1	3	1	1
35	2	2	2	1	3	1	1
36	3	2	2	1	3	1	1
37	1	1	3	1	1	1	1

N	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
38	2	1	3	1	1	1	1
39	3	1	3	1	1	1	1
40	1	2	3	1	1	1	1
41	2	2	3	1	1	1	1
42	3	2	3	1	1	1	1
43	1	1	3	1	1	1	1
44	2	1	3	1	1	1	1
45	3	1	3	1	1	1	1
46	1	2	3	1	1	1	1
47	2	2	3	1	1	1	1
48	3	2	3	1	1	1	1
49	1	1	3	1	2	1	1
50	2	1	3	1	2	1	1
51	3	1	3	1	2	1	1
52	1	2	3	1	2	1	1
53	2	2	3	1	2	1	1
54	3	2	3	1	2	1	1
55	1	1	3	1	2	1	1
56	2	1	3	1	2	1	1
57	3	1	3	1	2	1	1
58	1	2	3	1	2	1	1
59	2	2	3	1	2	1	1
60	3	2	3	1	2	1	1
61	1	1	3	1	3	1	1
62	2	1	3	1	3	1	1
63	3	1	3	1	3	1	1
64	1	2	3	1	3	1	1
65	2	2	3	1	3	1	1
66	3	2	3	1	3	1	1
67	1	1	3	1	3	1	1
68	2	1	3	1	3	1	1
69	3	1	3	1	3	1	1
70	1	2	3	1	3	1	1
71	2	2	3	1	3	1	1
72	3	2	3	1	3	1	1



El tiempo de ejecución total para las 72 combinaciones, utilizando el mismo equipo que en la aplicación macroscópica fue de 3 horas y 4 minutos para cada tipo de llegada.

Una vez realizadas todas las simulaciones, se ejecuta el módulo final que busca aquel vector cuya velocidad comercial del bus sea máxima obteniendo así la ubicación óptima final de las paradas en el eje.

El vector encontrado era idéntico en ambos casos de llegadas. En concreto, el vector seleccionado es el (2; 1; 1; 1; 1; 1; 1) cuya representación en la red vial se muestra en la figura 21.5. Analizando cada parada se llega a la siguiente conclusión:

- P1: La ubicación ha sido la más alejada del semáforo, de tal manera que las colas no alcancen el área de parada, como puede verse en la figura 21.5.
- P2: La ubicación final se mantiene abajo del semáforo, puesto que la alternativa propuesta se encontraba junto a la línea de detención y se producían demoras adicionales por las colas de vehículos.
- P3: La doble parada se ha emplazado aguas arriba y aguas abajo del semáforo. El tercer área de parada propuesta no se ha seleccionado en cuanto a que, al igual que en casos anteriores, era bloqueada por vehículos en la cola del semáforo.
- P4: esta parada ya tenía una ubicación fija.
- P5: Esta parada se ha ubicado aguas abajo del semáforo pero alejada de la intersección.
- P6: esta parada ya tenía una ubicación fija.
- P7: esta parada ya tenía una ubicación fija.

A modo de resumen se puede decir que, atendiendo a la localización definitiva de cada parada, se puede apreciar que las paradas siempre se localizan aguas abajo del semáforo o bien aguas arriba pero alejado del mismo de tal manera que las colas de automóviles durante el rojo no alcance el área de parada y permita la operación de los buses.

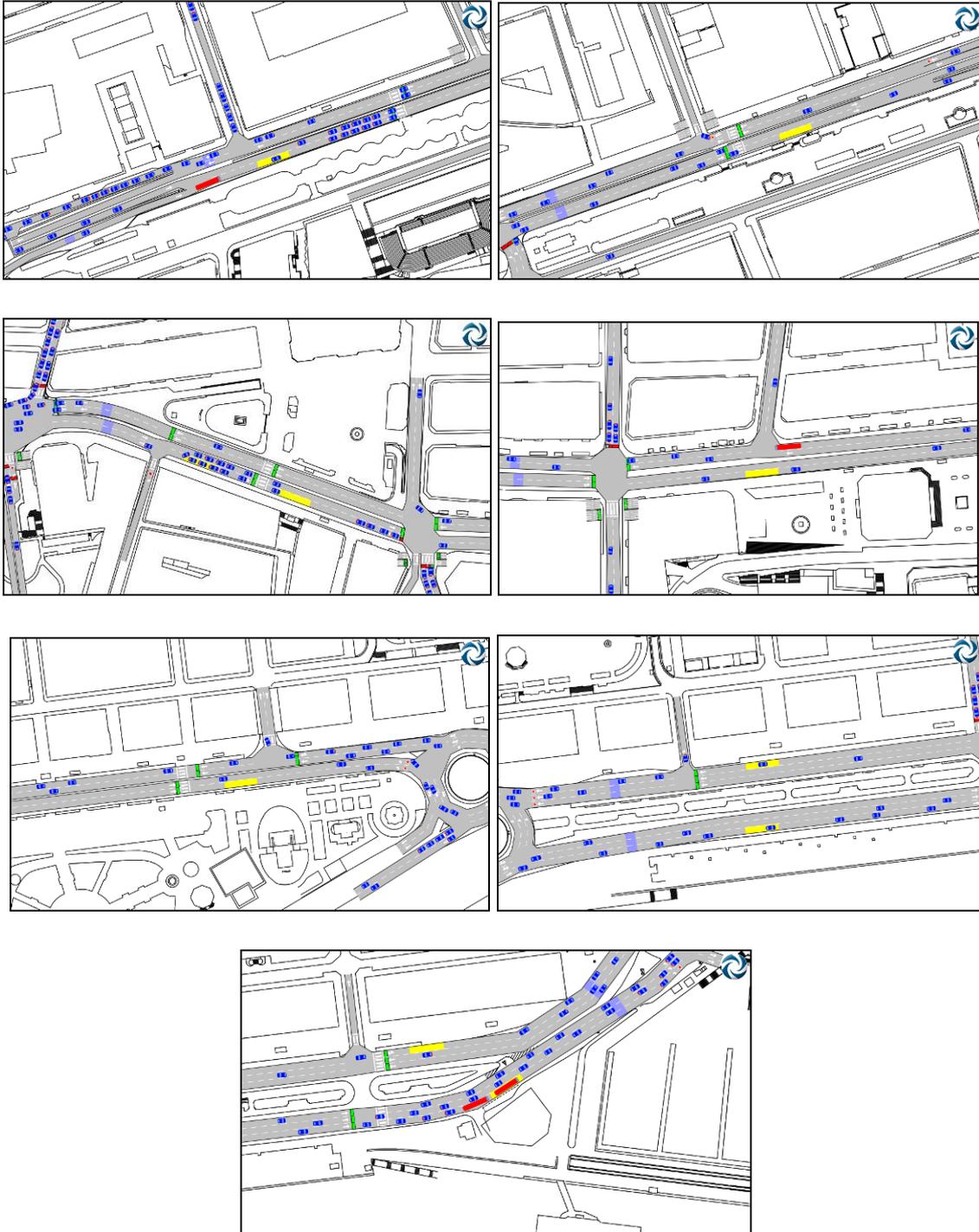


Fig. 21.5.- Ubicación final obtenida del modelo microscópico para cada parada del eje.

La solución final ha resultado independiente de la distribución de llegada de los viajeros, pero, sin embargo, el análisis conjunto de cada iteración para cada caso arroja resultados interesantes. En la figura 21.6 se representan las velocidades comerciales para cada iteración o combinación de alternativas de ubicación de paradas y

diferenciando según la tipología de llegada de viajeros. Como puede verse, el valor de la velocidad comercial varía sensiblemente al cambiar las posiciones 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 llegadas de pasajeros uniforme. Se observa que la velocidad comercial es menor cuando se supone llegada exponencial obteniéndose un valor máximo de 10,3 km/h y un valor mínimo de 6.9 km/h.

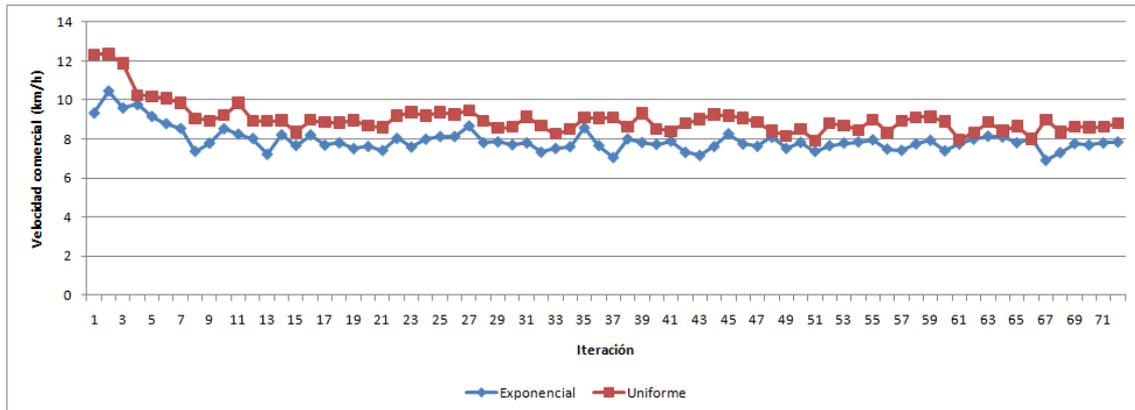


Fig. 21.6.- Velocidad comercial del bus en cada iteración (vector de paradas) y para distintos tipos de llegada de pasajeros a las paradas.

También puede resultar interesante analizar en qué puntos se producen las demoras a lo largo del recorrido. Para ello la figura 21.7 representa los diagramas espacio-tiempo para llegadas de pasajeros uniforme para las ubicaciones de mayor y menor velocidad comercial respectivamente. En esta figura puede verse que en las paradas ubicadas cerca de semáforos o intersecciones (P1, P2, P3 y P5) los buses sufren mayores tiempos de detención para el caso de la parada ubicada en la línea de detención, lo que provoca además una acumulación de buses a medida que se avanza en el eje, especialmente en el tramo final de la simulación.

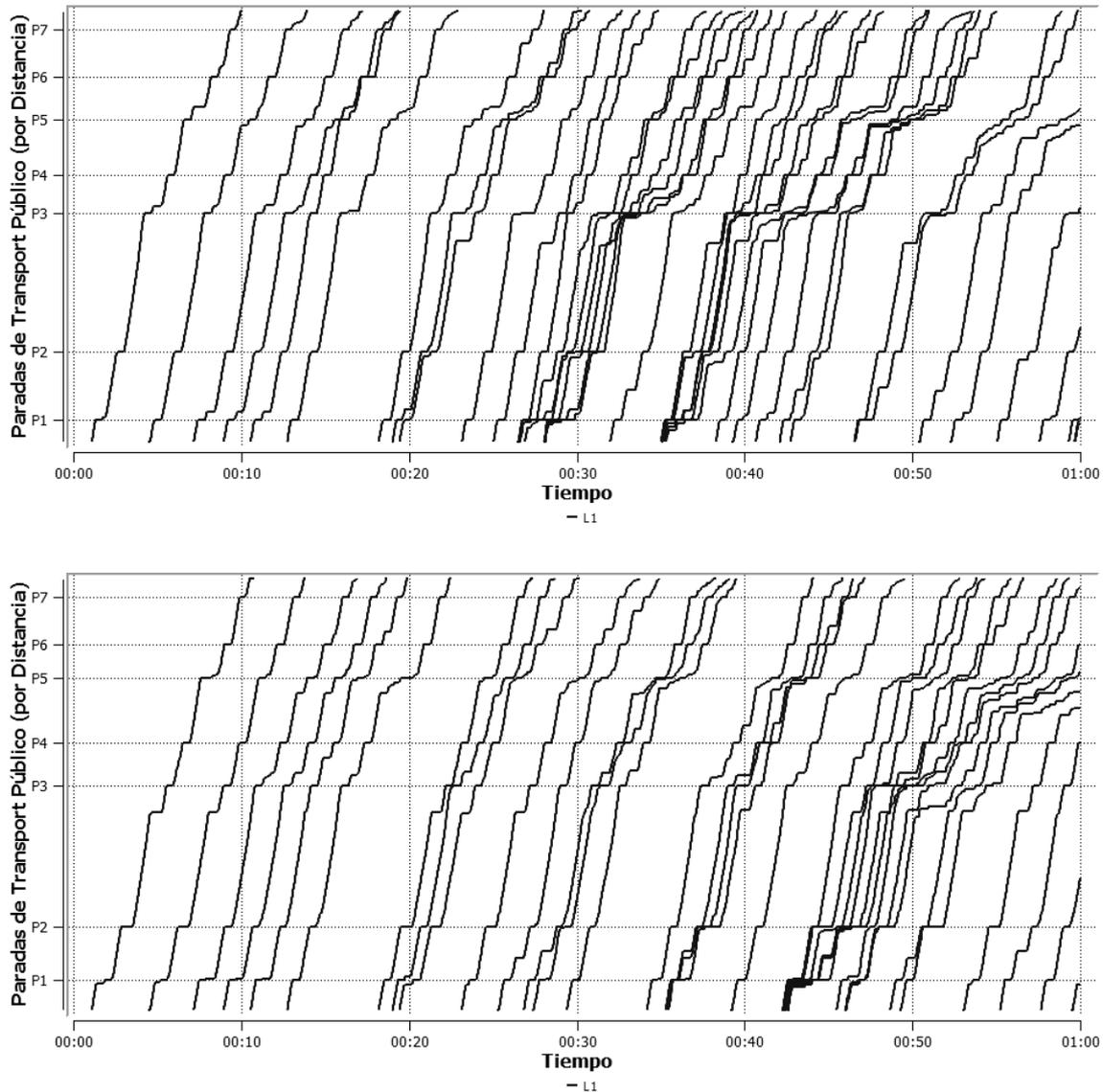


Fig. 21.7.- Diagramas espacio-tiempo para la mejor ubicación (arriba) y peor ubicación final.

21.3. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

Obtenidos y analizados los resultados de la aplicación a un caso real, resulta interesante conocer cómo puede variar la solución final ante diversas características operacionales y variables del tráfico en la red.

Por ello, se ha ejecutado el algoritmo para distintas combinaciones de flujo tanto de buses como de vehículos, y duración de ciclo semafórico en la misma red que en apartado anterior. La combinación de valores de las variables operacionales y del tráfico obedecen a los siguientes valores:



- Demanda de buses: Alta (120 buses/hora), Media (60 buses/hora) y Baja (30 buses/hora).
- Demanda de tráfico en el eje: Alta (2500 veh/hora), Media (1500 veh/hora) y Baja (500 veh/hora).
- Ciclo semafórico: Largo (120 sg.), Medio (90 sg.) y Corto (60 sg.)
- Proporción de verde = 0.66

En primer lugar se han realizado variaciones de demanda tanto de tráfico como de buses, manteniendo el ciclo en 90 sg. Se han estudiado de nuevo las 72 combinaciones de ubicación de paradas para cada combinación de demanda entre tráfico y buses.

Para casos de demanda de tráfico alta, la velocidad comercial disminuye en todos los casos debido al aumento de congestión en la red. Sin embargo, estas variaciones son muy importantes según la demanda de buses existente. Así, para casos con flujos de buses bajo, la velocidad comercial es mayor que para flujos de buses alto, donde al aumento de congestión de la red vial habrá que añadirle el mayor grado de congestión en las paradas, lo que implica tiempos de espera en cola de los buses. En la figura 21.8 se representan los valores de la velocidad comercial para cada una de las 72 combinaciones de paradas y para flujos alto, medio y bajo de buses. En esta figura se puede apreciar que a medida que el flujo de buses aumenta, las mejores ubicaciones corresponden a aquellas que van localizando las paradas de tal manera que se eviten las colas de los semáforos, desplazándolas aguas debajo de los mismos. Además, resulta llamativo como algunas ubicaciones finales de paradas pueden resultar beneficiosas para flujos elevados y perjudiciales para flujos bajos y viceversa.

Para demanda de tráfico medio (figura 21.9), la ubicación de mayor velocidad comercial coincide para todas las demandas de buses si bien es cierto que para demandas bajas la ubicación aguas abajo del semáforo arroja prácticamente los mismos valores de la velocidad comercial que en los casos de aguas arriba y alejadas del semáforo.

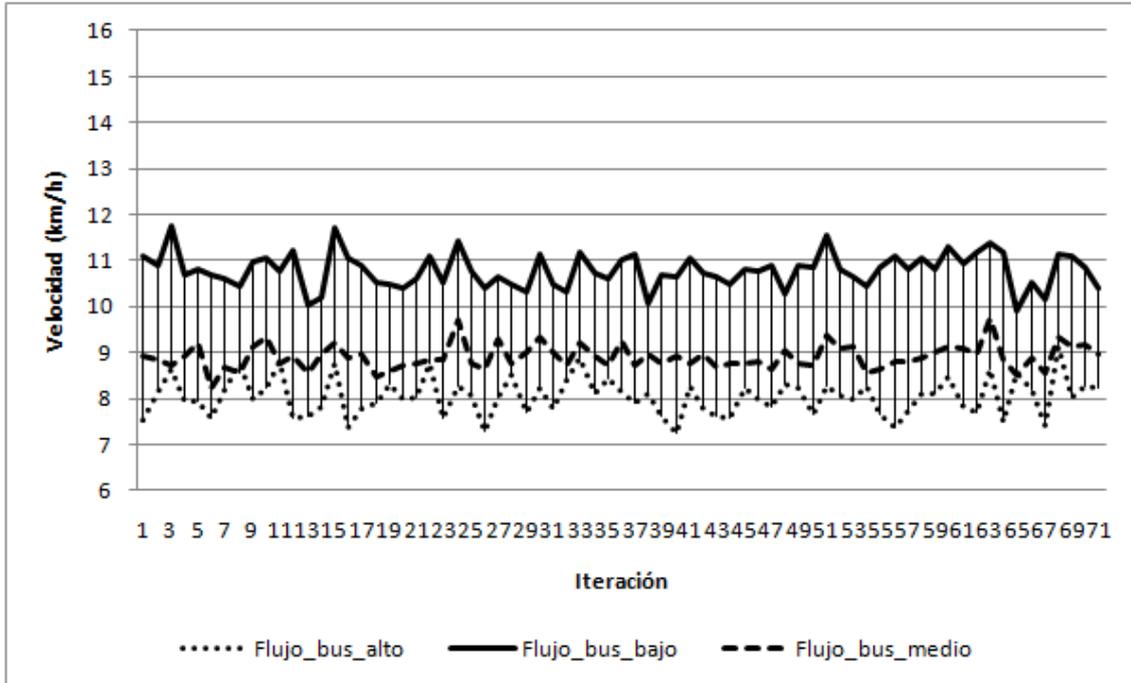


Fig. 21.8.- Velocidad comercial para demanda de tráfico alta.

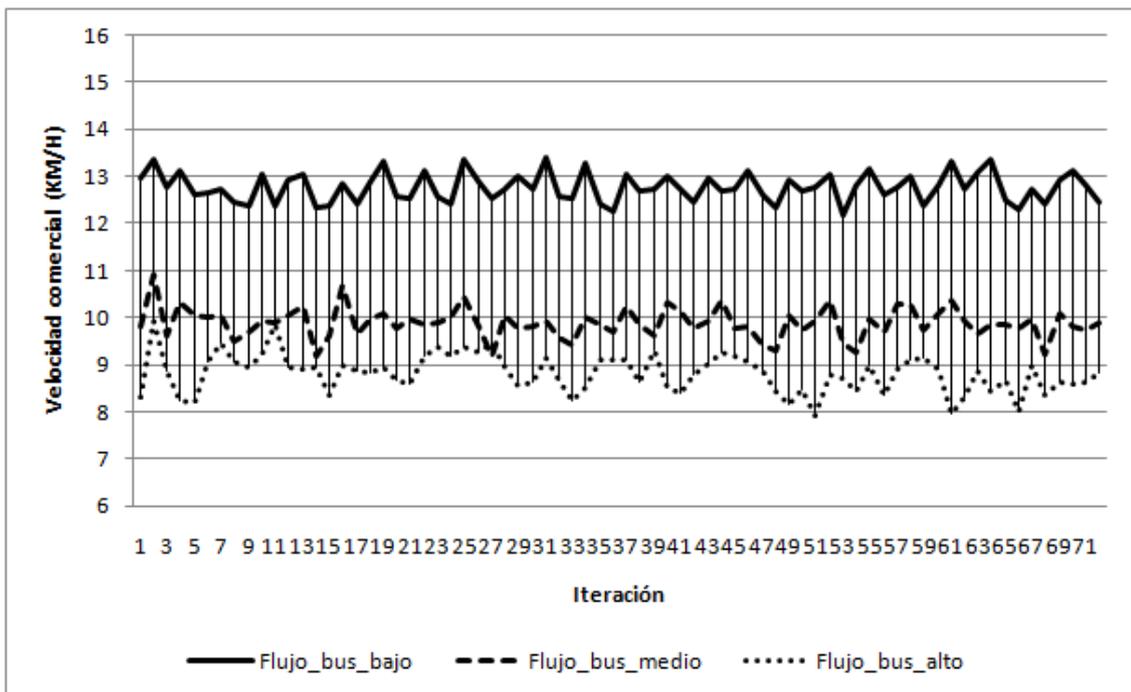


Fig. 21.9.- Velocidad comercial para demanda de tráfico media.

Finalmente, si la demanda de tráfico es baja la ubicación final será prácticamente indiferente debido a que la influencia del vehículo privado es muy baja, con lo que las



paradas situadas aguas arriba del semáforo deberán estar ubicadas a una distancia del mismo tal que los propios buses no saturen el área de parada, que son precisamente las ubicaciones que mayores velocidades comerciales se obtienen cuando el flujo de buses es alto. Es por este motivo por el que las variaciones en la velocidad comercial para un mismo nivel de demanda presenta una variación inferior a los 0.5 km/h para flujo de buses bajo y medio y una mayor sensibilidad a la ubicación para flujos altos, tal y como se muestra en la figura 21.10.

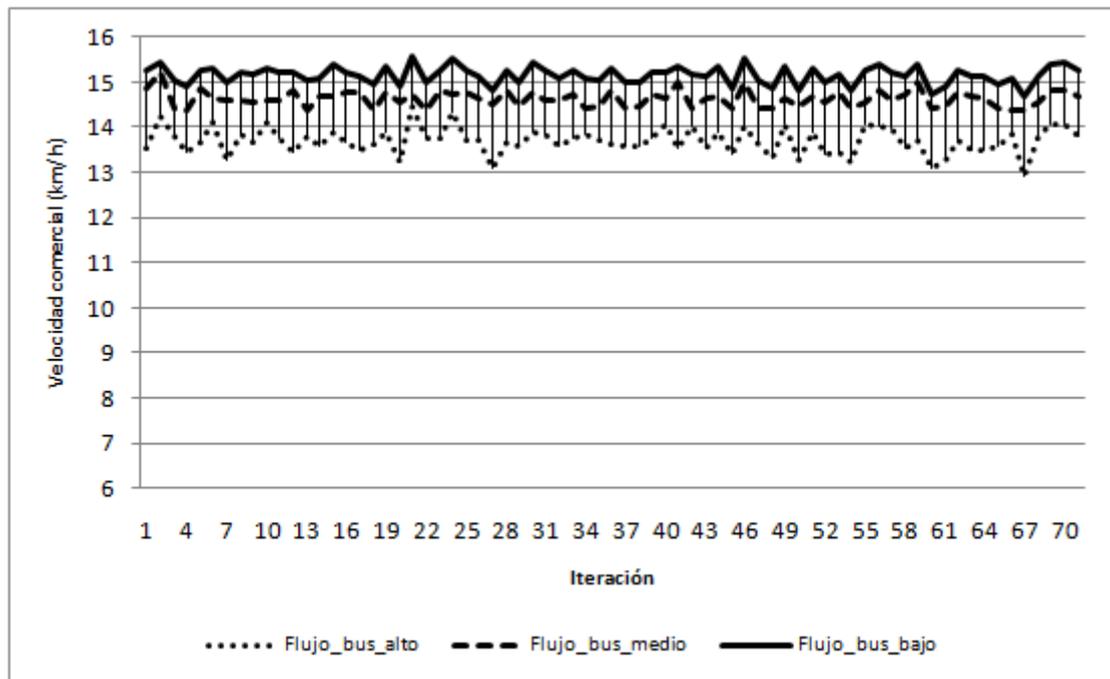


Fig. 21.10.- Velocidad comercial para demanda de tráfico baja.

Si se varía ahora la duración del ciclo semafórico, aunque manteniendo la proporción de verde se obtienen diferentes ubicaciones óptimas. Un ejemplo de ello se muestra en la tabla 21.2. En ella se representa la velocidad comercial para 3 tipologías de ubicación de las paradas del escenario de análisis: Aguas arriba del semáforo, pero alejado del mismo; aguas arriba junto a la línea de detención y aguas abajo. La representación gráfica de los resultados se muestra en la figura 21.11. En dicha figura puede apreciarse que, tal y como se ha expuesto anteriormente, a medida que se aumenta la demanda de tráfico y se congestiona la red, la velocidad comercial del bus disminuye. Sin embargo, puede apreciarse que, según el nivel de demanda (tanto de tráfico como de buses) y del ciclo, la ubicación de las paradas en el eje varía dando preferencia a las paradas aguas

arriba y alejadas o aguas abajo para demandas de tráfico altas, lo que concuerda con lo extraído de la figura 21.8.

Tabla 21.2.- Velocidades comerciales para diferentes ubicaciones de paradas, demandas y ciclos semafóricos.

N	Velocidad bus (km/h)					
	coches	buses	ciclo	Aguas arriba (alejada)	Aguas arriba	Aguas abajo
1	500	30	60	14.96	15.25	15.46
2	500	30	90	12.04	12.15	12.49
3	500	30	120	15.01	15.02	15.19
4	500	60	60	14.8	15.18	15.35
5	500	60	90	12.04	12.02	12.37
6	500	60	120	11.93	11.95	15.24
7	500	120	60	14.63	13.19	9.86
8	500	120	90	11.74	7.79	9.48
9	500	120	120	13.08	12.8	9.41
10	1500	30	60	11.92	12.33	13.85
11	1500	30	90	11.95	11.62	12.28
12	1500	30	120	11.62	11.43	11.47
13	1500	60	60	10.8	11.41	13.67
14	1500	60	90	11.69	11.38	11.79
15	1500	60	120	9.92	10.21	13.21
16	1500	120	60	8.67	5.01	5.93
17	1500	120	90	7.16	4.02	5.47
18	1500	120	120	5.55	2.84	4.46
19	2500	30	60	8.6	8.33	8.42
20	2500	30	90	9.8	9.04	9.92
21	2500	30	120	8.14	8.94	9.99
22	2500	60	60	8.27	6.95	8.07
23	2500	60	90	7.26	6.55	7.03
24	2500	60	120	7.43	6.1	7.84
25	2500	120	60	7.67	4.89	7.3
26	2500	120	90	7.29	4.83	7.06
27	2500	120	120	7.97	4.46	7.93

Analizando ahora cada ubicación final de las paradas según el nivel de demanda de tráfico (figura 21.12) y según el nivel de demanda de buses (figura 21.13) puede apreciarse qué ciclo (para la proporción de verde utilizada) es más conveniente en cada caso. Así, para niveles de demanda de tráfico y buses bajos es más conveniente ciclos cortos.

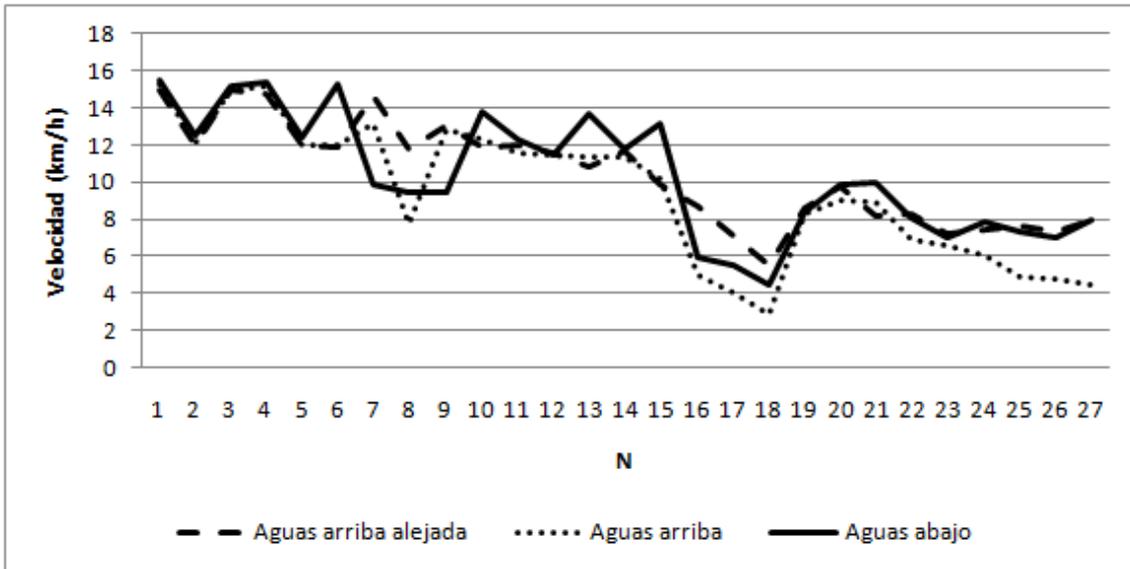


Fig. 21.11.- Velocidad de bus para cada combinación de demanda y ciclo.

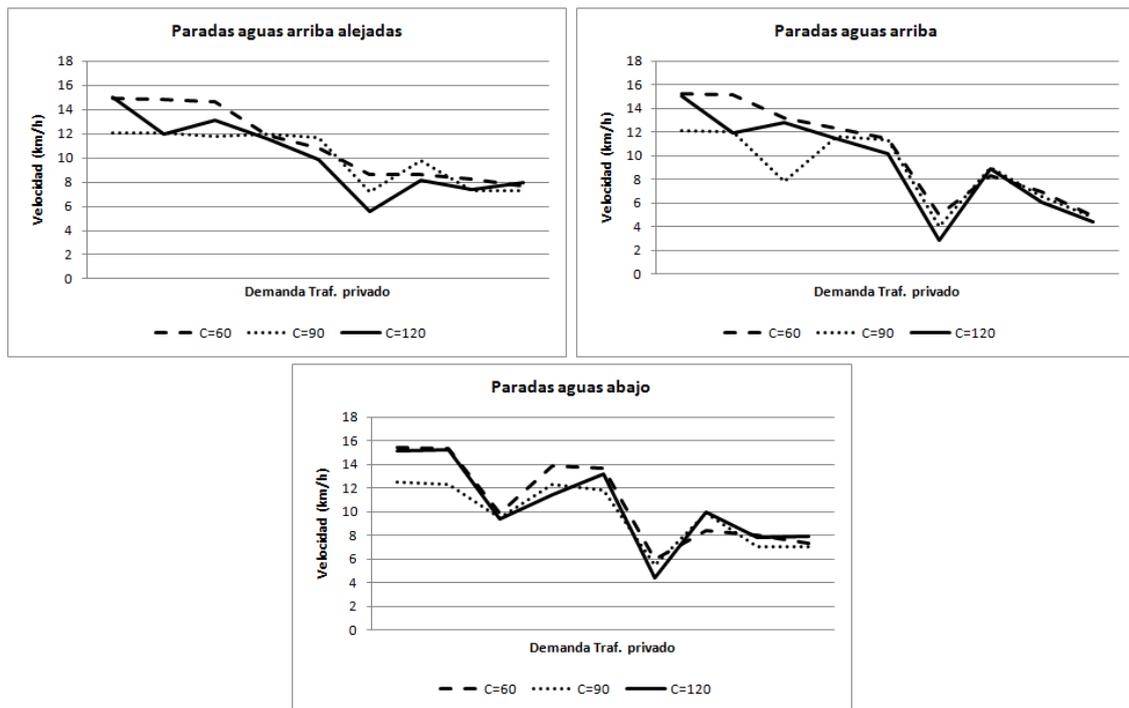


Fig. 21.12.- Velocidad comercial por tipología de parada para diferentes niveles de demanda de tráfico.

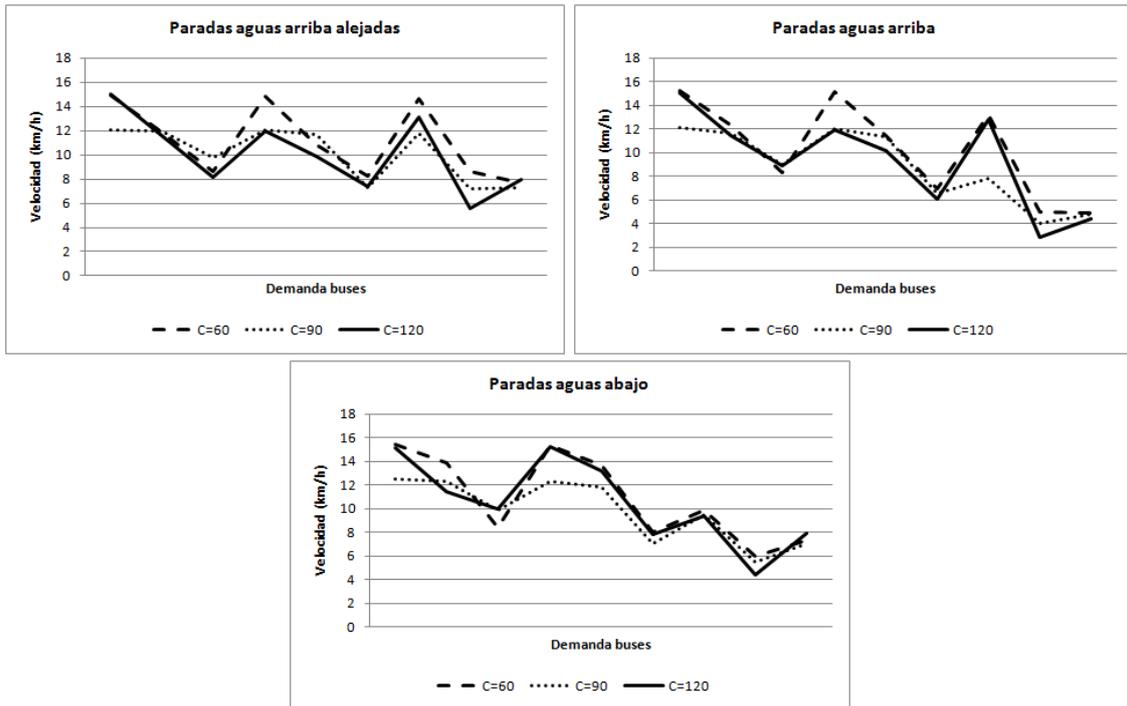


Fig. 21.13.- Velocidad comercial por tipología de parada para diferentes niveles de demanda de buses.

Finalmente, representando ahora la velocidad comercial obtenida en cada caso según el ciclo semafórico (figura 21.14) se aprecia que para los tres ciclos empleados siempre es más recomendable la ubicación aguas arriba alejada o aguas abajo del semáforo.

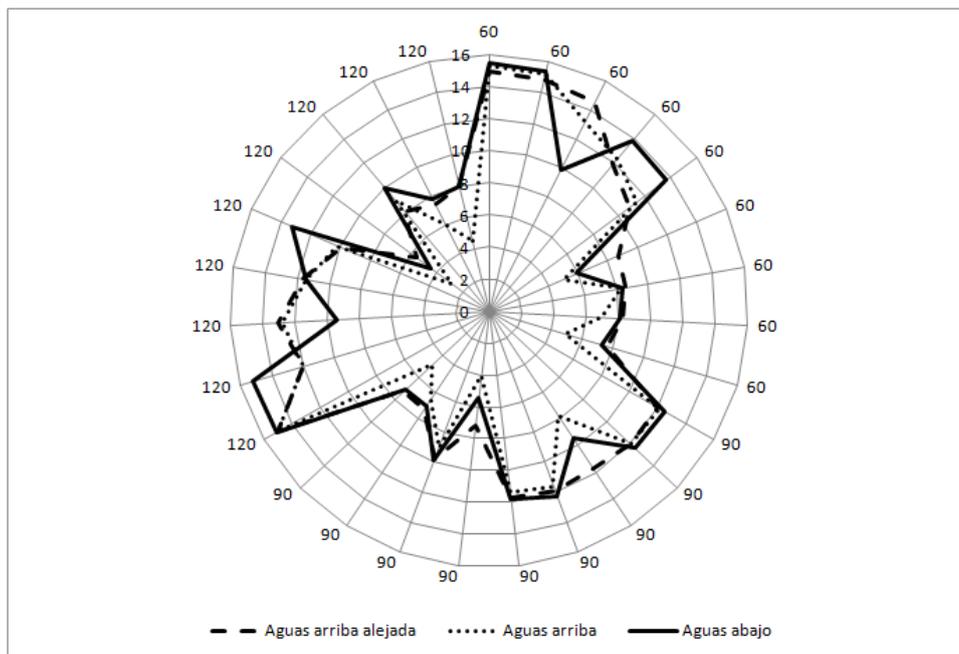


Fig. 21.14.- Ubicación para cada caso según el ciclo semafórico.

**PARTE VII: CONCLUSIONES Y LÍNEAS
FUTURAS DE INVESTIGACIÓN**

Capítulo 22

***CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE
INVESTIGACIÓN***



CAPÍTULO 22. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN.

22.1. CONCLUSIONES.

En esta tesis doctoral se ha propuesto un modelo de localización de paradas de bus mediante la aplicación secuencial de dos enfoques: un primer enfoque estratégico en el que se localizan las paradas de bus en todo el sistema de transporte público a escala macroscópica y un segundo enfoque táctico a escala microscópica donde, a partir de la solución macroscópica obtenida se afina la ubicación de paradas en ejes específicos de una ciudad.

La aplicación secuencial de ambos enfoques permite un mayor grado de detalle y mejores resultados que con la aplicación individual de cada uno de ellos, puesto que cada modelo se adapta a la escala del problema y permite un mayor grado de definición en las áreas más problemáticas.

Principales conclusiones del Modelo Macroscópico propuesto:

El Modelo Macroscópico propuesto se basa en un modelo de optimización bi-nivel, compuesto de un nivel superior que minimiza una función de costes totales del sistema (Coste Social) y un nivel inferior de en el que se incluye un modelo de partición modal-asignación. Además tiene en cuenta la influencia del tráfico privado, la operativa de la red vial y la congestión en los viales, vehículos de transporte público y paradas de bus.



El hecho de considerar la operativa en la red permite un mayor ajuste a la realidad de los tiempos de operación del sistema de transporte público, evitando sesgos los cuales se ha demostrado que influyen notablemente en los costes del sistema.

La validez y utilidad del modelo propuesto se ha comprobado mediante la aplicación a un caso real, donde se ha conseguido optimizar el sistema existente consiguiendo una mejora del servicio de transporte público con menos recursos, aumentando la velocidad comercial en un 10% y reduciendo la flota necesaria en un 3%

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. Además se ha demostrado que existe una independencia de los criterios de partida a la hora de crear zonas de igual distanciamiento de paradas, así como del vector inicial de distanciamientos, influyendo únicamente en el número de iteraciones a realizar y, consecuentemente, en el tiempo de computación.

A su vez, se ha constatado 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 ubicación final es dependiente del nivel de demanda y del grado de congestión de la red vial. A medida que ambas van aumentando se van variando sensiblemente la relación entre las variables consideradas en el modelo.

Finalmente, del análisis de las incidencias y operativa en la red se han obtenido importantes reducciones en la capacidad de los viales debidos a vehículos mal estacionados y maniobras de estacionamiento que incrementan notablemente los tiempos de viaje en los mismos. Además se ha propuesto un modelo de asignación de líneas de transporte público a paradas de buses divididas que constituye una ayuda operacional para situaciones de congestión en las paradas.



Principales conclusiones del Modelo Microscópico propuesto:

El modelo propuesto se apoya en el modelo previo macroscópico y permite obtener la localización óptima de las paradas de autobús dentro de un corredor urbano atendiendo a maximizar la velocidad comercial del transporte público en dicho eje.

La principal conclusión que se obtiene de la aplicación del modelo es que la ubicación de las paradas influye fuertemente en la velocidad comercial del bus en el eje. La aplicación del modelo al mismo caso real que el del modelo anterior ha obtenido un arco de variación de dicha velocidad desde 9 km/h hasta 12 km/h para el caso en el cual se supone una llegada lineal de los viajeros a las paradas, mientras que para el caso de que dicha llegada se tome como exponencial el arco de variación toma valores entre 6 y 10 km/h.

Si se analiza la posición final de las paradas sobre el escenario que proporciona estas velocidades máximas se puede ver que éstas han sido situadas bien aguas arriba de los semáforos pero alejados del mismo, bien aguas abajo. También se ha comprobado que la influencia de la ubicación de las paradas en los intervalos de los buses a lo largo del corredor no es muy significativa, si bien se aprecian más desviaciones en los casos en los que las paradas de bus están situadas en la línea de detención de semáforos y/o intersecciones.

Sí se han obtenido sin embargo variaciones de los intervalos ante diferentes distribuciones de llegadas de viajeros a las paradas, si bien este es un tema a tratar que se sale del objeto de esta tesis.

En el análisis de sensibilidad realizado se han establecido las tipologías de ubicación de paradas más adecuadas al nivel de demanda de buses, tráfico privado y ciclos semafóricos en la red vial.

Finalmente, destacar que parte de las investigaciones de esta tesis han sido publicadas en dos artículos de revistas indexadas más un tercer artículo en revisión:

- Ibeas, A., Alonso, B., Moura, J.L. y Ruisánchez, F.J. (2009). “Using M/M/∞ Queueing Model in On-Street Parking Maneuvers”. *Journal of Transportation Engineering (ASCE)*, 135(8), pp. 527-535.



- Ibeas, A., dell'Olio, L., Alonso, B. and Sáinz, O. (2010). "Optimizing bus stop spacing in Urban Areas". *Transportation Research Part E*, 46(3), pp. 446-458.
- Alonso, B., Moura, J.L., Ibeas, A., y Ruisánchez, F.J. "Public transport line assignment model to dual berth bus stops". *Journal of Transportation Engineering (ASCE)*. En revisión desde Febrero de 2010.

22.2. LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN.

A partir de los trabajos realizados en esta tesis se quedan abiertas diferentes líneas de investigación que se detallan a continuación:

- Considerar en el modelo de partición modal-asignación diferentes clases de usuarios y propósitos de viaje.
- Incluir las frecuencias de las diferentes líneas de transporte público como variables en el modelo propuesto debido a la fuerte correlación existente entre éstas y las paradas.
- Ampliar el análisis de sensibilidad profundizando en la ponderación de los costes del operador y del usuario de transporte público, diferentes valores del tiempo, etc.
- Estudiar la posibilidad de transformar dicho modelo en un modelo de optimización multi-nivel donde sea posible optimizar también otras variables como son: capacidad de los autobuses, itinerarios, horarios etc.
- Plantear nuevos algoritmos de solución.

REFERENCIAS



REFERENCIAS.

Abdulaal, M. y L. J. LeBlanc (1979). Continuous Equilibrium Network Design Models. *Transportation Research*, 13-B, pp. 19-32.

Abdulhai, B., Sheu, J-B. y Recker, W. (1999). Simulation of ITS on the Irvine FOT area using 'Paramics 1.5' scalable microscopic traffic simulator: Phase I: model calibration and validation. *California PATH Research Report*, UCB-ITS-PRR-99-12.

Al-Deek, H., Garib, A. and Radwan, A. E., (1995). A New Method for Estimating Freeway Incident Congestion. *Journal of the Transportation Research Board*, No. 1494, Transportation Research Board, pp. 30-39.

Balci, O. (1998). "Verification, Validation and Testing, in: *Handbook of Simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications and Practice*". Ed. by J. Banks, John Wiley.

Barceló, J, Ferrer, J.L. y Grau, R. (1994). AIMSUN and the GETRAM Simulation Environment. *Technical Report*. Departamento de Estadística e Investigación Operativa. Universidad Politécnica de Cataluña.

Barceló, J. y Casas, J. (2002), Heuristic Dynamic Assignment based on Microscopic Traffic Simulation. *Proceedings of the 9th Meeting of the Euro Working Group on Transportation*, Bari, Italia.

Barceló, J. y Casas, J. (2004). Methodological Notes on the Calibration and Validation of Microscopic Traffic Simulation Models. *Proceedings of the 83rd TRB annual meeting*, Washington, D.C.

Bard, J. (1984). An Investigation of the linear three-level programming problem. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 14, pp. 711-717.

Bard, J. (1998). "Practical Bilevel Programming: Algorithms and Applications". Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

Bard, J. y Falk, J. (1982). An explicit solution to the multi-level programming problem. *Computers and Operations Research*, 9, pp. 77-100.

Bard, J, y Moore, J. (1992). An Algorithm for the discrete bilevel programming problem. *Naval Research Logistics*, 39, pp. 419-435.



Barquin, M., (2001). Diseño Operacional de Redes de Transporte Público: Formulación Matemática y Algoritmos de Solución. *Master of science thesis*. Pontificia Universidad Católica de Santiago de Chile.

Baykal-Gursoy, M. y Xiao, W. (2004). Stochastic decomposition in M/M/∞ queues with Markov modulated service rates. *Queueing Systems*, 48 (1-2), 75-88.

Baykal-Gursoy, M., Xiao, W., Duan, Z. y Ozbay, K. (2006). Delay Stimulation for traffic flow interrupted by incidents. *86th Annual Transportation Research Conference*, Washington D.C.

Bazaraa, M. y Shetty, C. (1979). “*Nonlinear programming: theory and applications*”. John Wiley, New York.

Beckman, M. J., McGuire, C. B. y Winsten, C.B., (1956). “*Studies in the Economics of Transportation*”. Yale University Press, New Haven, Connecticut (USA).

Ben-Akiva, M., Davol, A., Toledo, T., y Koustopoulos, H.N. (2002). Calibration and evaluation of MITSIMLab in Stockolm. *82nd Annual Meeting Preprint CDROM, Transportation Research Board*, January 12-16, 2002, Washington, D.C. EEUU.

Benson, H. (1989). On the estructura ans properties of a linear multi-level programming problem. *Journal of Optimization Thepry and Applications*, 60, pp. 353-373.

Blair, C. (1992). The computational complexity of multi-level programs. *Annals of Operations Research*, 34, pp. 13-19.

Box. P.C. (2004). Curb-Parking Problems: Overview. *Journal of Transportation Eng.*, 130(1), 1-5.

Brown, N.L.C.K. (1996) Bus Systems and Accessibility: A Qualitative Approach, *MSc Thesis*, University of London.

Burgos, V., Fernández, R. y 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.

Ceder A. (1984) Bus frequency determination using passenger count data. *Transportation Research*, 18-A, pp.439-453.

Ceder, A. y Wilson, N.H.M. (1986). Bus network design. *Transportation Research*, 20-B, pp. 331-334.

Codina, E., García, R., Marín, A. y Verastegui, D. (2003). Modelos de equilibrio Cournot-Nash en planificación del transporte urbano. *Estudios de construcción y transporte*.



Codina, E., García, R., Marín, A. y Verastegui, D. (2004). Planificación matemática binivel en planificación del transporte urbano: Estado del arte y nuevos modelos. *Estudios de construcción y transporte*.

Cominetti R. y J. Correa (2001) Common-Lines and Passenger Assignment in congested Transit Networks. *Transportation Science*, 35(3) 250-267.

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.

Cowan, J.R. (1975). Useful headway models. *Transportation Research*, 9, pp. 371-375.

CTP (Confederation of British Road Passenger Transport) (1981), Urban planning and design for road public transport, CTP, London.

Chick, C. (1996). “*On-street Parking: A guide to Practice.*” Landor Publishing, London.

Chien, S.I. y Qin, Z. (2004). Optimization of bus stop locations for improving transit accessibility. *Transportation Planning and Technology*, 27 (3), pp. 211-227.

Chiriqui, C. (1974) *Reseaux de transport en commun: Les prolemes decheminement et d'accès*. *Center of Transport Research*, University of Montreal, Publication, No. 11.

Chiriqui, C. y Robillard, P. (1975). Common bus lines. *Transportation Science*, 9, pp. 115-121.

Chu, L., Liu, H.X., Recker, W. y Zhang, H.M. (2004). Performance Evaluating of Adaptive Ramp Metering Algorithms Using Microscopic Traffic Simulation Model. *Journal of Transportation Engineering*, 130(3), pp. 330-338.

Danas, A. (1980). Arrivals of passengers and buses at two London bus stops. *Traffic Engineering and Control* 21(10), 472-475.

Davis, L. (ed.) (1991). “*Handbook of Genetic Algorithms*”, Van Nostrand Reinhold, New York.

De Cea, J. y Fernández, J.E. (1993) Transit assignment for congested public transport systems: an equilibrium model. *Transportation Science*, 27, 133-147.

De Cea, J., Fernández, E., Dekock, V., Soto, A., y Friez, T., (2003). ESTRAUS: a computer package for solving supply-demand equilibrium problems on multimodal urban transportation networks with multiple user classes. *In Proceedings of the Transportation Research Board Annual Meeting*, Washington, DC.



dell'Olio, L. (2005). Un modelo de localización de paradas de autobús mediante la optimización de la operación del sistema de transporte público urbano. *Tesis doctoral*. Universidad de Burgos.

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*. 1971, 23-31.

Demetsky, M.J., Lin, B.B.-M. (1982). Bus stop location and design. *Transportation Engineering Journal, ASCE*, 108 (TE4), pp. 313-327

Department of the Environment and Welsh Office (1973) Bus operation in residential and industrial areas. Joint circular n.82/73.

Dial, R. B. (1967) Transit Pathfinder Algorithms. Highway Res. Record 205 67-85.

Di Gangi M., B. Montella (1995). Progetto di una rete di trasporto collettivo mediante indicatori di prestazione. In *Metodi e modelli per la pianificazione e la gestione dei sistemi di trasporto collettivo* a cura di Nuzzolo A. e Russo F., pp.13-51, Franco Angeli Editore.

EBTU (1982) *Tratamento preferencial ao transporte colectivo par onibus*. Empresa Brasileira dos Transportes Urbanos, Brasilia.

Edmunds, T. y Bard, J. (1991). Algorithms for nonlinear bilevel mathematical programs. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 21, pp. 83-89.

Edmunds, T. y Bard, J. (1992). An Algorithm for the mixed-integer nonlinear bilevel programming problem. *Annals of Operations Research*, 34, pp. 149-162.

Faradyne, P.B. (2000). Traffic Incident Management Handbook. Prepared for Federal Highway Administration, Office of Travel Management.

Fearnside, K., D. P. Draper (1971) Public Transport Assigning – A New Approach. *Traffic Eng. Control* 298-299.

Fellendorf, M. (1994). VISSIM: A microscopic simulation tool to evaluate actuated signal control including bus priority. *Technical paper, Session 32, 64th ITE Annual Meeting*, Dallas. EEUU.

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.

Fernández, R. (2001a) Modelling bus stop interactions, *PhD Thesis*, University of London (Sin publicar)



- Fernández, R. (2001b) A new approach to bus stop modelling. *Traffic Eng. Control* 42(7), 240-246.
- Fernández, R. (2003) Study of bus stop operation in arterial roads by simulation. *ITE Journal*, 73(4), 77-81.
- Fernández, R. (2007). PASSION 5.0-a model for microscopic simulation of multiple-berth bus stops. *Traffic Eng. Control* 48 (7), 324-328.
- Fernandez. R y Burgos. V (2004). Results of the microscopic modelling of traffic interactions at stop, junctions and Roads for the design of bus rapid transit facilities. *European transport conference*.
- Fernández, R. y Planzer, R. (2002) On the capacity of bus transit systems. *Transport Reviews*, 22(3), 267-293.
- Fernández, R. y Tyler, N. (1999). Design of bus stops as part of bus priorities. *Proceedings of the European Transport Conference 1999. Seminar D: Traffic Management, Safety and ITS*, PTRC, London.
- Fernández, R. y Tyler, N. (2005) Effect of passenger-bus-traffic interactions on bus stop operations. *Transp. Planning Tech.* 28(4), 273-292.
- Fernández, R., Cortes C., y Burgos, V. (2007) Resultados de la modelación microscópica de interacciones vehículos-pasajeros-tráfico para el diseño de sistemas BRT. *XIII Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte*, Santiago, October. Chile.
- Fitzpatrick, K., Perkinson, D., y Hall, K., (1997). Findings from a survey on bus stop design. *Journal of Public Transportation*, 1 (3), pp. 17-27.
- Florian, M. (1977) A traffic equilibrium model of travel by car and public transit modes. *Transportation Science* 2, pp. 166-179.
- Florian, M. y Chen, Y. (1991). A bilevel programming approach to estimating O-D matrix by traffic counts. CRT-750, Centre de Recherche sur les Transports.
- Frank, M. y Wolfe, P. (1956). An algorithm for quadratic programming, *Naval Research Logistics Quarterly*, 3, pp. 95—110.
- Friestz, T., Tobin, R., Cho, H. y Mehta, N. (1990). Sensitivity analysis based heuristics algorithms for mathematical programs with variational inequality constraints. *Mathematical Programming*, 48, pp. 265-284.
- Frye, A. (1996). Bus travel-a vital link in the chain of accesible transport. *In: Proceedings of Bus and Coach '96*. London Institute of Mechanical Engineers.



Furth, P. G., y A. B. Rahbee (2000) Optimal Bus Stop Spacing Using Dynamic Programming and Geographic Modeling. *Transportation Research Record* 1731, pp. 15-22.

Furth, P.G. y SanClemente, J.L. (2006). Near side, far side, uphill, downhill: Impact of bus stop location on bus delay. *Transportation Research Record*, 1971, pp. 66-73.

Gardes, Y., May, A.D., Dahlgren, J. y Skabardonis, A. (2002). Freeway Calibration and Application of the PARAMICS Model. *81st Annual Meeting Preprint CD-ROM, Transportation Research Board*, January 13-17, 2002, Washington, D.C. EEUU.

Gendreau, M. (1984) Etude approfondie d'un modèle d'équilibre pour l'affectation de passagers dans les réseaux de transports en commun. Pub. 384, Centre de Recherche sur les Transports, Université de Montréal.

Ghoneim N. S. A. y Wirasinghe S. C., (1987). Optimum zone configuration for planned urban commuter rail lines. *Transportation Research*, 21, pp. 106-114.

Giannopoulos, G.A., (1990). "*Bus Planning and Operation in Urban Areas: A Practical Guide*". Avebury, Gower Pub. Co. Ltd., UK.

Gibson. J. (1996) Effects of a downstream signalised junction on the capacity of a multiple berth bus stop. *Proc.: 24th PTRC European Transport Forum*, London.

Gibson, J. y Fernández, R. (1995) Recomendaciones para el diseño de paraderos de buses de alta capacidad. *Apuntes de ingeniería* 18, pp. 35-50.

Gibson, J., Baeza y Willumsen, L.G., (1989) Bus-stops, congestion and congested bus-stops. *Traffic Eng. Control* 30, 291-302.

Gipps, P.G. (1981). A behavioural car-following model for computer simulation. *Transportation Research*, 15-B, pp. 105-111.

Gipps, P.G. (1986a). A model for the structure of lane-changing decisions. *Transportation Research*. 20-B, No. 5, pp. 403-414.

Gipps, P.G. (1986b). MULTSIM: A Model for Simulating Vehicular Traffic on Multi-Lane Arterial Roads. *Mathematics and Computers in Simulation*, 28. 291-295.

Glaister, S., (1986). Bus deregulation, competition and vehicle size. *Journal of Transport Economy and Policy* 20 2, pp. 217-244.

Gleason, J.M., 1973. Set covering approach to the location of express bus stops. *Omega*, 3, pp. 605-608.

Glover, F. (1989) Tabu Search-Part I, *ORSA Journal on Computing*, 1(3). Summer 1989.



- Glover, F. (1989) Tabu Search-Part II, *ORSA Journal on Computing*, 2(1). Winter 1990.
- Goldberg, D.E. y Richardson, J. T. (1987). Genetic algorithms with sharing for multimodal function optimization. Genetic Algorithms and their Applications. *Proc. of the Second International Conference on Genetic Algorithms and Their Applications*, 41-49.
- Goolsby, M.E. (1971). Influence of Incidents on Freeway Quality of Service. *Presented at 50th TRB Annual Meeting*, January.
- Gordon, R., Reiss, R., Haenel, H., Case, E.R., French, R.L., Mohaddes, A., and Wolcott, R. (1996). Traffic Control Systems Handbook. Report FHWA-SA-95-032, Federal Highway Administration, Washington, D.C.
- Grau, R. y Barceló J. (1993). The design of GETRAM: A Generic Environment for Traffic Analysis and Modeling. Research Report DR 93/02. Departament d'Estadística i Investigació Operativa. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Greater Glasgow Passenger Transport Executive and the Strathclyde Regional Council (1975) Guidelines for bus operation in urban areas, Scotland.
- Hansen, P., Jaumard, B. y Savard, G. (1990). New branching and bounding rules for the linear bilevel programming. *SIAM Journal of Statistical and Scientific Computing*, pp. 556-559.
- Hobbs, B. y Nelson, S. (1992). A nonlinear bilevel model analysis of electric utility demand-side planning issues. *Annals of Operations Research*, 34, pp. 255-274.
- Hogan, W. (1973). Point-to-set maps in mathematical programming. *SIAM Review*, 15, pp. 591-603.
- Holland, J. (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, University of Michigan Press, Ann Arbor.
- 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.
- Hourdakis, J., Michalopoulos, P.G. y Kottommannil, J. (2003) Practical Procedure for Calibrating Microscopic Traffic Simulation Models. *Transportation Research Record*, 1852, 130-139.
- Ibeas, A., y L. dell'Olio (2004) The problem of the location of bus-stops in urban public transport. *World Conference of Transportation Research Society*, Istanbul, Turquia.
- Ibeas, A., Moura, J. L., Dell'Olio, L., y Ortuzar J. de D., (2006). Costing School Transport in Spain. *Transportation Planning And Technology*, 29 (6), pp. 483-501.



Ibeas, A., Moura, J. L. y dell'Olio, L. (2007). Modelo de Movilidad de la ciudad de Santander. Documento de trabajo. Universidad de Cantabria.

Ibeas, A., Moura, J. L. y dell'Olio, L. (2008). Estimación del valor del tiempo en áreas intermodales en la ciudad de Santander. Documento de trabajo. Universidad de Cantabria.

Janson, B. N. (1991). Dynamic Assignment for Urban Road Networks. *Transportation Research*, 25-B, Nos. 2/3, pp. 143-161.

Jansson, J.O., (1980). A simple bus line model for optimisation of service frequency and bus size. *Journal of Transport Economy and Policy* 14 (1), pp. 53–80.

Jeroslow, R. (1985). The polynomial hierarchy and a simple model for competitive analysis. *Mathematical Programming*, 32, pp. 146-164.

Kleijnen, J.P.C. (1995). Theory and Methodology: Verification and Validation of Simulation Models. *European Journal of Operational Research*, Vol. 82, pp. 145-162, 1995.

Koshy, R.Z. y Arasan, V.T. (2005) Influence of bus stops on flow characteristics of mixed traffic. *J. Transp. Eng.* 131(8), 640-643.

Kraft WH. y Boardman, Tj., 1972. Location of bus stops. *Journal of Transportation Engineering*, 98 (TE1), pp. 103-16.

Kuah, Geok K. y Perl, J., 1988. Optimization of feeder bus routes and bus-stop spacing. *Journal of Transportation Engineering*, 114 (3), pp. 341-354

Larrain, H. y Muñoz, J.C. (2008) Public transit corridor assignment assuming congestion due to passenger boarding and alighting. *Netw. Spat. Econ.* 8, 241–256.

Law, A. y Kelton, W. (1991) “*Simulation modelling and analysis*”. McGraw-Hill, New York.

LeBlanc L. J. (1988) Transit system network design, *Transportation Research*, 22-B, pp. 383-390.

LeClercq, F. (1972) A Public Transport Assigning Model. *Traffic Eng. Control* 91-96.

Lesley, (1976). Optimum bus stop spacing. *Traffic Engineering & Control*, 17(10) 399-401, October November;

Liu, H.X., Chu, L. y Recker, W. (2001). Paramics API Development Document for Actuated Signal, Signal Coordination and Ramp Control. California PATH working paper, UCB-ITS-PWP-2001-11.



London Transport (1976) South east London bus study, report of the Steering Group, Greater London Council and London Transport Executive, London.

Marcotte, P. (1988). A note on a bilevel programming algorithm by LeBlanc and Boyce *Transportation Research*, 22-B, pp. 233-237.

Marcotte, P. y Savard, G. (1991). Novel approaches to the discrimination problem. G-91-21. Groupe d'études et de recherche en analyse des décisions.

Manstetten, D., Krautter, W. y Schwab, T. (1998). Traffic Simulation Supporting Urban Control System Development. Robert Bosch GmbH, Corporate Research and Development. *Information and Systems Technology*, P.O. Box 10 60 50, 70049 Stuttgart, Alemania.

May, A.D. (1990). *Traffic Flow Fundamentals.* Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey.

McShane, W. R., y Roess, R. P. (1990). *Traffic Engineering.* Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.

Michalewicz, Z. (1992). *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.

Miller, T., Friesz, T. y Tobin, R. (1992). Heuristics algorithms for delivered Price spatially competitive network facility location problems. *Annals of Operations Research*, 34, pp. 177-202.

Moore, J. y Bard, J. (1990). The mixed integer linear bilevel programming problema. *Operations Research*, 39, pp. 911-921.

Norambuena, I. J. (2002) Diseño óptimo de sistemas de transporte urbano. *Master of science thesis*. Pontificia Universidad Católica de Santiago de Chile.

Pretty RL y Russell DJ (1988). Bus Boarding rates. *Australian Road Research*, 18(3)145-151

Räsänen, M., 2006. Functionality of a bus stop at exit or merging lanes and its impact on driver behavior. *Traffic Engineering and Control*, 47 (1), pp. 29-32.

Reeves, C. (1993). *Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems*, Blackwell Scientific Publications.

Roads Service Transportation Unit (2005). *Bus Stop Design Guide*. Translink. Reino Unido.



- Robusté, F. (2006). Gestión de redes de autobuses urbanos: Innovación en España. *Jornadas: Optimizar la gestión del transporte público urbano: Un paso más hacia la sostenibilidad*. Santander. Noviembre.
- Robusté, F. y E. Merino (1997) Configuración logística de un sistema de transporte urbano en autobús para ciudades intermedias. *Tesis Doctoral*. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona.
- Russo F., Giordano R., Amirante (1999) Una procedura per la progettazione degli itinerari dei servizi di trasporto collettivo nell'ambito dei piani di bacino. *4° Convegno PFT2-CNR*, Roma.
- Saka, A., 2001. Model for determining optimum bus-stop spacing in urban areas. *Journal of Transportation Engineering*, 127 (3), pp. 195-199.
- Sankar, Kavitha, & Karthi (2003) Sankar, R., Kavitha, J., & Karthi, S. (2003). Optimization of bus stop locations using GIS as a tool for Chennai City—A case study. *Map India Conference 2003, Poster session*.
- SECTU, 1989. Strategic urban transport study for Santiago: Final Report. Chile.
- Segall, R. (1989). “*Bi-level geometric programming: a new optimization model*”. DMS-University of Lowell Olsen Hall.
- Schöbel, A. (2005). Locating stops along bus or railway lines—a bicriteria problem. *Annals of Operations Research*, 136 (1), pp. 211-227.
- Shi, H., Luo, L. y Bao, T. (2007) Research on the way to determine types and scales of bus stops. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 7(2).
- Silva, P.C.M. (2001) Modelling interactions between bus operations and traffic flow. *PhD Thesis*, University of London (Unpublished).
- Smith B. y Ulmer, Jared M. (2003). Freeway Traffic flow rate measurement: Investigation into impact of measurement time interval. *Journal of Transportation Eng.*, 129(3), 223-229.
- Smith, B., Qin, L., y Venkatanarayana, R. (2003). Characterization of freeway Capacity Reduction Resulting from Traffic Accidents. *Journal of Transportation Eng.*, 129(4), 362-368.
- Spiess, H. (1984) Contribution à la théorie et aux outils de planification des réseaux de transport urbains. Pub. 382, Centre de Recherche sur les Transports, Université de Montréal.



Stackelberg, G.E. (1952). *“The Theory of the Market Economy”*. Oxford University Press.

Suh, S. y Kim, T. (1992). Solving nonlinear bilevel programming models of equilibrium network desing problems: a comparative review. *Annals of Operations Research*, 34, pp. 203-218.

Tanaka, S., Kuwahara, M., Suda, Y., Honda, K., Shiraishi, T., Onuki, M., y Kano, M. (2006). Safety Evaluation of On-street Parking Scheme Using Virtual Reality Traffic Experiment System. *13th ITS World Congress*, London.

Transportation and Road Research Laboratory (TRRL) (1963). A method of measuring saturation flow at traffic signals. *Road Note No. 34*, TRRL, London.

Transportation Research Board (TRB). (2000). “Highway capacity manual.” Transportation Research Circular–Special Rep. 209, Washington, D.C.

Transportation Research Board (2003) Transit Capacity and Quality of Service. TCRP report 100, Washington D.C.

TSS-Transport Simulation Systems. (2006). *“AIMSUN 5.1 Microsimulator User’s Manual Version 5.1.4.”*

Tyler, N. (1996) Accessibility to the Bus System. Working paper, University of London Centre for Transport Studies, London.

Tyler, N. (2002). *Accessibility and the bus system: from concepts to practice*. Thomas Telford, London.

Tyler, N., Silva, P, Brown, N. y Fernández, R. (2003) *Operational impacts of bus stops. In: .Accessibility and the bus system: from concepts to practice*. N. Tyler (ed), 99-137. Thomas Telford, London, 2003.

Ukpong, I., Dissanayake, D. y Zhang, B. (2006). Development of a micro-simulation traffic model to investigate on-street parking and its impacts on sustainable environments: A case study in the city of Newcastle upon Tyne. *13th ITS World Congress*. London.

Valencia, A. y Fernández, R. (2007). Representación Macroscópica de la Operación segregada del Transporte Público en superficie. *Actas del XIII Congreso Chileno de Ingeniería del Transporte*, Santiago de Chile. Octubre.

Valleley, M. (1997). *“Parking Perspectives. A source book for the development of parking policy.”* Landor Publishing, London.



Van Nes, R. (2000). Optimal stop and line spacing for urban public transport networks, Analysis of objectives and implications for planning practice, *TRAIL Studies in Transportation Science*, S2000/1, Delft University Press, 2000, ISBN 90-407-2081-9.

Van Nes R. (2001) The impact of alternative access modes on urban transit network design. *80th Annual meeting of the Transportation Research Board*.

Van Nes, R. y P.H.L. Bovy, (2000). Importance of objectives in urban transit network design. *Transportation Research Record* No.1735; pp. 25-34.

Vega, A., Robuste, F., Ibeas, A., Diaz, J.,M., J.L. Moura (2002) Un modelo de operación del sistema de transporte público colectivo urbano en superficie considerando el tráfico en la ciudad. *V Congreso de Ingeniería del Transporte*, Santander, pp. 255-262.

Vijayakumar, S., (1986). Optimal vehicle size for road-based urban public transport in developing countries. *Transportation Review*, 6 (2), 193–212.

Vuchic, V. R., (1981). *Urban Public Transportation: Systems and Technology*. Prentice-Hall, Inc. NJ.

Vuchic, V.R. y Newell, G.F. (1968). Rapid Transit Interstation Spacing for Minimum Travel Time. *Transportation Science*, Vol. 2, No. 4, pp. 359-374

Wardrop, J. G., (1952). Some theoretical aspects of road traffic research. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Part II*, Vol. 1, pp. 325–378.

Webster, F. V. y Cobbe, B.M (1966). Traffic signals. Road Res. Tech. Paper, 56. HMSO, London, England

Wen, U. y Shu, S. (1986). The hybrid algorithm for solving the three-level linear programming problem. *Computers and Operations Research*, 13, pp. 367-377.

Wirasinghe S. C., (1980). Nearly optimal parameters for a rail/ feeder-bus system on a rectangular grid. *Transportation Research*, 14A, pp. 33-40.

Wirasinghe, S. C., y Ghoneim, N. S., (1981). Spacing of bus stop for many to many travel demand. *Transportation Science*, 15 (3), pp. 210-221.

Wong, S.C., Hai Yang, W. S., Au Yeung, S. L., Cheuk, Lo, M. K. (1998). Delay at Signal-Controlled Intersection with Bus Stop Upstream. *Journal of Transportation Engineering*, 124(3), pp. 229-234.

Wylie, B.J.N, Cameron, G., White, M., Smith, M. y McArthur, D. (1993). PARAMICS: Parallel Microscopic Traffic Simulator. *In proceedings of EuroCM User Group meeting*, Paris. Francia.



Yang, Q. y Koutsopoulos, H.N. (1996). A Microscopic Traffic Simulator for Evaluation of Dynamic Traffic Management Systems. *Transportation Research*, 4-C, No. 3, pp. 113-129.

Yang, Q., Koutsopoulos, H.N. y Ben-Akiva, M. (1999). A Simulation Laboratory for Evaluating Dynamic Traffic Management Systems. *79th Annual Transportation Research Board Meeting*, Washington, D.C. EEUU.

Yousif, S. y Purnawan (1999). On-street parking: effects on traffic congestion. *Traffic Engineering and Control*, 40(9), 424-427.

Zhao, X., Gao, Z., y Li, K. (2008). The capacity of two neighbour intersections considering the influence of the bus stop. *Physica A* 387, 4649–4656.

ANEXO I

***CONDICIONES DE OPTIMALIDAD DEL PROBLEMA
DIAGONALIZADO DE PARTICIÓN MODAL-ASIGNACIÓN***

ANEXO I. CONDICIONES DE OPTIMALIDAD DEL PROBLEMA DIAGONALIZADO DE PARTICIÓN MODAL-ASIGNACIÓN.

Las condiciones de optimalidad del problema diagonalizado, se obtienen construyendo el Lagrangiano L con la función objetivo (7.10) y restricciones (7.11)-(7.15), multiplicadas por sus respectivas variables duales.

Derivando L respecto de h_r^{kpm} , se reproducen las condiciones de *Wardrop* para cada modo, dadas por (7.5). En tanto, derivando L respecto a las variables de demanda T_w^{kpn} y T_w^{kpm} , e igualando a cero, se obtienen las restantes condiciones de equilibrio planteadas para la demanda, que corresponden a las expresadas por las ecuaciones (7.6) y (7.7):

$$\begin{aligned}
\min L = & \sum_k \sum_p \sum_{\tilde{m}} \sum_a \int_0^{f_a^{kp\tilde{m}}} c_a^{kp\tilde{m}}(x) dx + \sum_k \sum_p \sum_{\tilde{m}} \sum_s \int_0^{V_s^{kp\tilde{m}}} \hat{c}_s^{kp\tilde{m}}(x) dx + \\
& \sum_k \sum_p \sum_n \frac{1}{\lambda^{kp}} \sum_w T_w^{kpn} (\ln T_w^{kpn} - 1) - \sum_k \sum_p \sum_n \frac{1}{\gamma^{kpn}} \sum_w T_w^{kpn} (\ln T_w^{kpn} - 1) + \\
& \sum_k \sum_p \sum_n \frac{1}{\gamma^{kpn}} \sum_{m \in n} \sum_w T_w^{kpm} (\ln T_w^{kpm} - 1) + \sum_k \sum_p \sum_w u_w^{kp} \left(T_w^{kp} - \sum_n T_w^{kpn} \right) + \\
& \sum_k \sum_p \sum_n \sum_w u_w^{kpn} \left(T_w^{kpn} - \sum_{m \in n} T_w^{kpm} \right) + \sum_k \sum_p \sum_n \sum_m \sum_w u_w^{kpm} \left(T_w^{kpm} - \sum_{r \in I_w^m} h_r^{kpm} \right)
\end{aligned} \tag{I.1}$$

Para este último caso, derivando L respecto a h_r^{kpm} , T_w^{kpn} y T_w^{kpm} se obtiene:

$$\frac{\partial L}{\partial h_r^{kpm}} = \frac{\partial}{\partial h_r^{kpm}} \left(\sum_k \sum_p \sum_{\tilde{m}} \sum_a \int_0^{f_a^{kp\tilde{m}}} c_a^{kp\tilde{m}}(x) dx + \sum_k \sum_p \sum_{\tilde{m}} \sum_s \int_0^{V_s^{kp\tilde{m}}} \hat{c}_s^{kp\tilde{m}}(x) dx \right) - u_w^{kpm} \tag{I.2}$$

$$\frac{\partial L}{\partial T_w^{kpn}} = \frac{1}{\lambda^{kp}} \ln T_w^{kpn} - \frac{1}{\gamma^{kpn}} \ln T_w^{kp} - u_w^{kp} + u_w^{kpn} \tag{I.3}$$

$$\frac{\partial L}{\partial T_w^{kpm}} = \frac{1}{\gamma^{kpn}} \ln T_w^{kpm} - u_w^{kpn} + u_w^{kpm} \tag{I.4}$$

En el equilibrio, si h_r^{kpm} , T_w^{kpn} y $T_w^{kpm} > 0$, entonces se debe cumplir:

$$\frac{\partial}{\partial h_r^{kpm}} \left(\sum_k \sum_p \sum_{\bar{m}} \sum_a \int_0^{I_a^{kpm}} c_a^{kpm}(x) dx + \sum_k \sum_p \sum_{\bar{m}} \sum_s \int_0^{V_s^{kpm}} \hat{c}_s^{kpm}(x) dx \right) - u_w^{kpm} = 0 \quad (I.5)$$

$$\frac{1}{\lambda^{kp}} \ln T_w^{kpn} - \frac{1}{\gamma^{kpn}} \ln T_w^{kpn} - u_w^{kp} + u_w^{kpn} = 0 \quad (I.6)$$

$$\frac{1}{\gamma^{kpm}} \ln T_w^{kpm} - u_w^{kpn} + u_w^{kpm} = 0 \quad (I.7)$$

De (I.7) se obtiene:

$$\frac{1}{\gamma^{kpm}} \ln T_w^{kpm} - u_w^{kpn} + u_w^{kpm} = 0 \Rightarrow T_w^{kpm} = e^{\left(\gamma^{kpm} \cdot (u_w^{kpn} - u_w^{kpm})\right)} = e^{\left(\gamma^{kpm} \cdot u_w^{kpn}\right)} \cdot e^{\left(-\gamma^{kpm} \cdot u_w^{kpm}\right)} \quad (I.8)$$

Por otra parte, de (7.12) se debe cumplir que:

$$T_w^{kpn} = \sum_{m \in n} T_w^{kpm} \quad (I.9)$$

Sustituyendo T_w^{kpm} de (I.8):

$$T_w^{kpn} = \sum_{m' \in n} e^{\left(\gamma^{kpn} \cdot u_w^{kpn}\right)} \cdot e^{\left(-\gamma^{kpn} \cdot u_w^{kpm'}\right)} = e^{\left(\gamma^{kpn} \cdot u_w^{kpn}\right)} \sum_{m' \in n} e^{\left(-\gamma^{kpn} \cdot u_w^{kpm'}\right)} \quad (I.10)$$

Con lo que la proporción de viajes en el modo m en su nodo será:

$$P_w^{kpm} = \frac{T_w^{kpm}}{T_w^{kpn}} = \frac{\cancel{e^{\left(\gamma^{kpn} \cdot u_w^{kpn}\right)}} \cdot e^{\left(-\gamma^{kpn} \cdot u_w^{kpm}\right)}}{\cancel{e^{\left(\gamma^{kpn} \cdot u_w^{kpn}\right)}} \sum_{m' \in n} e^{\left(-\gamma^{kpn} \cdot u_w^{kpm'}\right)}} = \frac{e^{\left(-\gamma^{kpn} \cdot u_w^{kpm}\right)}}{\sum_{m' \in n} e^{\left(-\gamma^{kpn} \cdot u_w^{kpm'}\right)}} \quad (I.11)$$

Que es la expresión (7.6).

Por otro lado, sumando (I.6) y (I.7) se tiene que:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\lambda^{kp}} \ln T_w^{kpn} - \frac{1}{\gamma^{kpn}} \ln T_w^{kpn} - u_w^{kp} + u_w^{kpn} + \frac{1}{\gamma^{kpm}} \ln T_w^{kpm} - u_w^{kpn} + u_w^{kpm} = 0 \Rightarrow \\ \Rightarrow T_w^{kpm} = e^{\left(-\gamma^{kpm} \cdot \left(\frac{1}{\lambda^{kp}} \ln T_w^{kpn} - \frac{1}{\gamma^{kpn}} \ln T_w^{kpn} - u_w^{kp}\right)\right)} \cdot e^{\left(-\gamma^{kpm} \cdot u_w^{kpm}\right)} \end{aligned} \quad (I.12)$$

Realizando la sumatoria de (I.12) para $\forall m' \in n$:

$$\begin{aligned} \sum_{m' \in n} T_w^{kpm'} &= T_w^{kpn} = e^{\left(-\gamma^{kpn} \cdot \left(\frac{1}{\lambda^{kp}} \ln T_w^{kpn} - \frac{1}{\gamma^{kpn}} \ln T_w^{kpn} - u_w^{kp}\right)\right)} \cdot \sum_{m' \in n} e^{(-\gamma^{kpn} \cdot u_w^{kpm'})} \Rightarrow \\ &\Rightarrow \frac{1}{\gamma^{kpn}} \ln T_w^{kpn} = -\frac{1}{\lambda^{kp}} \ln T_w^{kpn} + \frac{1}{\gamma^{kpn}} \ln T_w^{kpn} + u_w^{kp} - V_w^{kpn} \end{aligned} \quad (\text{I.13})$$

De (I.13) se tiene:

$$V_w^{kpn} = -\frac{1}{\lambda^{kp}} \ln T_w^{kpn} + u_w^{kp} \Rightarrow T_w^{kpn} = e^{(-\lambda^{kp} \cdot V_w^{kpn})} \cdot e^{(\lambda^{kp} \cdot u_w^{kp})} \quad (\text{I.14})$$

Sustituyendo en (7.11):

$$T_w^{kp} = \sum_{n'} T_w^{kpn'} \Rightarrow T_w^{kp} = e^{(\lambda^{kp} \cdot u_w^{kp})} \cdot \sum_{n'} e^{(-\lambda^{kp} \cdot V_w^{kpn'})} \quad (\text{I.15})$$

Y, finalmente, dividiendo (I.14) entre (I.15) se obtiene la proporción de viajes del nido n con respecto del total:

$$P_w^{kpn} = \frac{T_w^{kpn}}{T_w^{kp}} = \frac{e^{(-\lambda^{kp} \cdot V_w^{kpn})}}{\sum_{n'} e^{(-\lambda^{kp} \cdot V_w^{kpn'})}} \quad (\text{I.16})$$

Finalmente, se puede demostrar, que el primer que el primer término de (I.5) es igual al coste de la ruta r para cada propósito de viaje p , modo m tipo de usuario k : c_r^{kpm}

$$\frac{\partial L}{\partial h_r^{kpm}} = c_r^{kpm} - u_w^{kpm} = 0 \quad (\text{I.17})$$

De (I.17) se desprende la expresión equivalente a la condición de equilibrio de flujos en rutas:

$$c_r^{kpm*} \begin{cases} = u_w^{kpm*}, & \text{si } h_p^* > 0 \\ \geq u_w^{kpm*}, & \text{si } h_p^* = 0 \end{cases} \quad \forall p \in P_w \quad (\text{I.18})$$

ANEXO II

***DESCRIPCIÓN DE LOS ALGORITMOS DE
DIAGONALIZACIÓN Y FRANK-WOLFE***

ANEXO II. DESCRIPCIÓN DE LOS ALGORITMOS DE DIAGONALIZACIÓN Y FRANK-WOLFE.

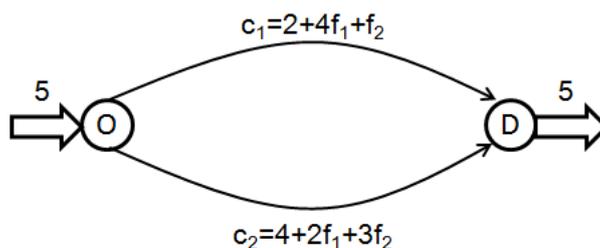
II.1. ALGORITMO DE DIAGONALIZACIÓN.

Se trata de un procedimiento iterativo simple del tipo Jacobi. El método es también conocido en la literatura como método de relajación (Florian, 1981).

Consta de 3 pasos:

- Inicialización, donde se encuentra un vector de flujos factible.
- Diagonalización, donde se diagonalizan las funciones de coste (se hacen dependientes de su propio flujo).
- Convergencia, donde se verifica la solución entre dos iteraciones sucesivas.

A continuación se muestra con un pequeño ejemplo la aplicación del algoritmo para la red de la figura con los costes en los arcos dependientes de los flujos en ambos, y con 5 viajes entre O y D.



Paso 1: Inicialización: Solución inicial factible: $f_1^0 = 5$; $f_2^0 = 0$

Paso 2: Diagonalización (primera iteración: $n=1$).

$$\hat{c}_1^1(f_1) = 2 + 4f_1$$

$$\hat{c}_2^1(f_2) = 2 + 2 \cdot 5 + 3f_2 = 14 + 3f_2$$

Resolver el problema diagonalizado:

$$\text{Min}Z(f_1, f_2) = \int_0^{f_1} (2 + 4x)dx + \int_0^{f_2} (14 + 3x)dx$$

s.a.:

$$f_1 + f_2 = 5$$

$$f_1, f_2 \geq 0$$

Esto equivale a:

$$\text{Min}Z(f_1) = 2f_1 + 2f_1^2 + 14(5 - f_1) + 1.5(5 - f_1)^2$$

s.a.:

$$f_1 \geq 0$$

$$\frac{dZ}{df_1} = 2 + 4f_1 - 14 - 3(5 - f_1) = 0 \Rightarrow f_1 = 3.857 \Rightarrow f_2 = 1.143$$

Test de parada.

Diagonalización (segunda iteración: $n=2$).

$$\hat{c}_1^1(f_1) = 2 + 4f_1 + 1.143 = 3.143 + 4f_1$$

$$\hat{c}_2^1(f_2) = 4 + 2 \cdot 3.857 + 3f_2 = 11.72 + 3f_2$$

Y el problema diagonalizado queda:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Min}Z(f_1, f_2) = \int_0^{f_1} (3.14 + 4x)dx + \int_0^{f_2} (11.72 + 3x)dx \\ \text{s.a. :} \\ f_1 + f_2 = 5 \\ f_1, f_2 \geq 0 \end{array} \right\} f_1 = 3.368 \Rightarrow f_2 = 1.632$$

Test de parada: $3.857 \neq 3.368$; $1.143 \neq 1.632$

Diagonalización (tercera iteración: $n=3$).

$$\hat{c}_1^2(f_1) = 2 + 4f_1 + 1.632 = 3.632 + 4f_1$$

$$\hat{c}_2^2(f_2) = 4 + 2 \cdot 3.368 + 3f_2 = 10.736 + 3f_2$$

Y el problema diagonalizado queda:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Min}Z(f_1, f_2) = \int_0^{f_1} (3.632 + 4x)dx + \int_0^{f_2} (10.736 + 3x)dx \\ \text{s.a. :} \\ f_1 + f_2 = 5 \\ f_1, f_2 \geq 0 \end{array} \right\} f_1 = 3.158 \Rightarrow f_2 = 1.842$$

Test de parada. $3.368 \neq 3.158$; $1.632 \neq 1.842$

Diagonalización (cuarta iteración: $n=4$)

II.2. ALGORITMO DE FRANK-WOLFE.

El algoritmo de Frank-Wolfe es un algoritmo iterativo que consta de dos fases:

Supóngase el siguiente problema de optimización en el que se busca minimizar la función $Z(x)$ no lineal en x , continua, diferenciable y convexa:

$$\begin{array}{l} \text{Min}Z(x) \\ \text{s.a. :} \\ Ax = b; \quad x \geq 0 \end{array}$$

Fase I: *Aproximación lineal* del problema original (sujeto a las mismas restricciones) en un punto inicial dado (solución factible). La solución a esta aproximación, combinada con la solución anterior entrega una *dirección de búsqueda*.

Dada una solución factible x^k , sea y^k solución al siguiente problema de programación lineal:

$$\begin{array}{l} \text{Min}Z_L(y) \\ \text{s.a. :} \\ Ay = b; \quad y \geq 0 \end{array}$$

En que $Z_L(x)$ corresponde a una aproximación lineal de Z en x^k .

$$Z_L(y) = Z(x^k) + \nabla Z(x^k)^T (y - x^k)$$

Esta nueva solución será factible al problema original. Esta expresión es lineal en la variable (y^k). Así, minimizar esta función es equivalente a minimizar: $\nabla Z(x^k)^T y$

Así, la solución óptima al problema de aproximación lineal se puede obtener resolviendo el siguiente problema equivalente:

$$\text{Min } \nabla Z(x^k)^T y$$

$$\text{s.a.: } Ay = b; \quad y \geq 0$$

Una vez encontrada la solución a este problema (y^k) se define $d^k = y^k - x^k$ como la dirección factible de máximo cambio local de la función Z.

Fase II: Se determina cuánto moverse en esa dirección de búsqueda de modo de minimizar la función objetivo original: *minimización unidimensional*.

Por lo tanto, habrá que encontrar una solución x^{k+1} que minimice la función Z en la dirección d^k .

$$x^{k+1} = x^k + \lambda^k d^k; \quad 0 \leq \lambda^k \leq 1$$

Esta nueva solución estará entre x^k y y^k , por lo que será necesariamente factible. Para obtenerla se debe resolver:

$$\text{Min } Z(x^{k+1}) = \text{Min } Z(x^k + \lambda^k d^k);$$

$$\text{s.a.: } 0 \leq \lambda^k \leq 1$$

Criterio de parada: Dado que se debe cumplir que:

$Z_L^k(y^k) = Z(x^k) + \nabla Z(x^k)^T (y^k - x^k) \leq Z(x^*)$ existen dos cotas para indicar cuándo parar:

La Cota inferior estará descrita por: $Z_L^k(y^k)$, la cual no es necesariamente monótona creciente.

La Cota superior, dado que Z(x) es convexa, debe suceder que $Z(x^k) \geq Z(x^*)$ y esta cota sí es monótona decreciente, por lo que se puede acotar el valor óptimo:

$$\text{Max}_{t \in \{1, \dots, k\}} \{Z'_L(y^t)\} \leq Z(x^*) \leq Z(x^k)$$

Por lo tanto, el algoritmo para cuando la cota inferior y superior estén suficientemente cerca en términos absolutos o porcentuales.

A continuación se muestra con un pequeño ejemplo la aplicación del algoritmo para la red de la figura con el coste en cada arco dependiente de su propio flujo, y con 10 viajes entre O y D.



$$t_1 = 10 \left(1 + 0.15 \left(\frac{x_1}{2} \right)^4 \right); \quad t_2 = 20 \left(1 + 0.15 \left(\frac{x_2}{4} \right)^4 \right); \quad t_3 = 25 \left(1 + 0.15 \left(\frac{x_3}{3} \right)^4 \right)$$

Iteración 0: Encontrar una solución factible: para ello se realiza una asignación a rutas mínimas con los tiempos a flujo libre:

$$x_i = 0 \Rightarrow \begin{cases} t_1 = 10 & x_1^0 = 10 \\ t_2 = 20 & \Rightarrow x_2^0 = 0 \\ t_3 = 25 & x_3^0 = 0 \end{cases}$$

Iteración 1: Aproximación Lineal: se calculan los tiempos con la asignación anterior y se vuelve a realizar la asignación.

$$\begin{cases} t_1^0 = 947.5 & x_1^1 = 0 \\ t_2^0 = 20 & \Rightarrow x_2^1 = 10 \\ t_3^0 = 25 & x_3^1 = 0 \end{cases}$$

Minimización Unidimensional:

$$\begin{aligned} x^{k+1} &= x^k + \lambda^k (y^k - x^k) \\ \min Z &\left(x^k + \lambda^k (y^k - x^k) \right) \\ \text{s.a.: } &\lambda^k \in [0, 1] \end{aligned}$$

Recordando que en este caso: $Z = \sum_a \int_0^{f_a} c_a(x) dx$, se obtiene que:

$$\text{Min}Z = \int_0^{x_1^0 + \lambda^0(y_1^0 - x_1^0)} 10(1 + 0.15(x/2)^4) dx + \int_0^{x_2^0 + \lambda^0(y_2^0 - x_2^0)} 20(1 + 0.15(x/4)^4) dx + \int_0^0 25(1 + 0.15(x/3)^4) dx$$

Luego, para el problema ejemplo se tiene:

$$\text{Min}Z(\lambda) = \int_0^{10-10\lambda} 10(1 + 0.15(x/2)^4) dx + \int_0^{10\lambda} 20(1 + 0.15(x/4)^4) dx \Rightarrow$$

$$Z = 100(1-\lambda) + 0.6(5(1-\lambda))^5 + 200\lambda + 2.4(2.5\lambda)^5 \Rightarrow$$

$$\frac{dZ}{d\lambda} = 0 \Rightarrow \lambda = 0.596$$

Con estos valores de λ , se obtienen los nuevos flujos en los arcos y sus respectivos tiempos:

$$\begin{aligned} x_1^1 &= 10(1-0.596) = 4.04 & t_1^1 &= 34.97 \\ x_2^1 &= 10 \cdot 0.596 = 5.96 & \Rightarrow t_2^1 &= 34.79 \\ x_3^1 &= 0 & t_3^1 &= 25 \end{aligned}$$

Iteración 2: Asignación a rutas mínimas y nueva minimización unidimensional:

$$y_1^1 = 0; y_2^1 = 0; y_3^1 = 10$$

$$\text{Min}Z = \int_0^{4.04-4.04\lambda^1} 10(1 + 0.15(x/2)^4) dx + \int_0^{5.96-5.96\lambda^1} 20(1 + 0.15(x/4)^4) dx + \int_0^{10\lambda^1} 25(1 + 0.15(x/3)^4) dx \Rightarrow$$

$$x_1^2 = 3.39 \quad t_1^2 = 22.38$$

$$x_2^2 = 5.00 \Rightarrow t_2^2 = 27.32$$

$$x_3^2 = 1.61 \quad t_3^2 = 25.31$$

Continuando con las iteraciones, se obtienen los resultados que se presentan en la siguiente tabla:

Iteración (j)	λ	x_1^j	x_2^j	x_3^j	t_1^j	t_2^j	t_3^j
3	0.0035	3.62	4.83	1.55	26.1	26.3	25.3
4	0.02	3.54	4.73	1.72	24.8	25.8	25.4
5	0.007	3.59	4.70	1.71	25.6	25.7	25.4

Recordando que: $Z_L(x^k) = 10x_1 + 0.6(x_1/2)^5 + 20x_2 + 2.4(x_2/4)^5 + 25x_3 + 2.25(x_3/3)^5$ y que: $Z_L(y) = Z(x^k) + \nabla Z(x^k)^T (y - x^k)$ se puede obtener la siguiente tabla que muestra la evolución de los valores en la función objetivo y en su aproximación lineal a medida que va iterando el algoritmo:

Iteración	$Z(x^k)$	$Z_L(y^k)$	x^k	y^k
0	1975	-7300	[10;0;0]	[0;10;0]
1	197.405	98.777	[4.04;5.96;0]	[0;0;10]
2	189.969	160.551	[3.39;5;1.61]	[10;0;0]
3	189.449	181.723	[3.62;4.83;1.55]	[0;0;10]
4	189.112	183.598	[3.54;4.73;1.72]	[10;0;0]
5	188.341		[3.59;4.70;1.71]	[0;0;10]

ANEXO III

PSEUDOCÓDIGOS

ANEXO III. PSEUDOCÓDIGOS.

III.1. MODELO MACROSCÓPICO PROPUESTO DE OPTIMIZACIÓN BINIVEL DE UBICACIÓN DE PARADAS DE BUS.

Algoritmo Hooke-Jeeves.

```

-----
hooke_paradas --> PRINCIPAL
-----

-----
main_paradas --> ARRANQUE DEL PROCESO
-----

-----
archivo_paradas --> modificación de los archivos de Estras
-----

-----
nodos_iniciales
-----

% Lectura de todos los posibles nodos que podrán ser parada en
nuestra red

% lo ponemos en forma de matriz...
-----
caract_nodos
-----

% Creamos una tabla con las características de todos los nodos...
%
linea,nodo,area,centroide_erca,limite_area,es_cabecera,en_tunel
-----

matriz_resultados2

```

```

-----
% Leo todos los nodos, los voy guardando en 'leidos' si aun no
están ahí.

% Con el salto correspondiente segun la zona y si tienen un
centroide

% a la distancia correspondiente segun el buffer, voy guardando
los que

% cumplen en 'son_parada'.
% Las cabeceras son siempre parada, las obligaremos a serlo.
-----
prueba_seleccion_N y filtro_2
-----
% Selección de paradas elegidas (linea,sentido,nodo,parada) tras
filtrar

% consecutivas, repetidas, junto a límite de área o junto a
cabeceras.

-----
fichero_aclnks y fichero_detencion
-----
% Generamos los nuevos ficheros aclnks y detenciones con
formato de Etraus

-----
fichero_de_volcado
-----
% Volcado de los datos en Etraus

-----
Mi_etraus --> Genera la nueva red
-----
obtengo_datos --> Se obtienen datos de Etraus que se van a utilizar:
matriz de km, tiempos...

-----
obten_valores --> Se toman los valores fijos de tiempos de acceso,
espera... costes de rodadura, personal...
-----

```

POR_LINEA_viajeros_y_flota --> se calculan los viajeros y flota para cada línea

funcion_coste --> se calculan costes, viajeros...y finalmente las funciones de coste Z, Zb, Zc, Zo

Guardamos el valor de la función de coste encontrada...

vector_salida =

[identif,contF,zF,zFb,zFc,zFo,dF1,dF2,dF3,dF4,dF5,pF,VctmF,VtF,flotaF,tmF];

Algoritmo Tabú

Tabu_distancias

soluc_inicial

Se calcula la Z para el vector inicial y este vector se guarda como Tabú

while no_es_menor < 5

vecindario

se calculan los vecinos del vector, +-1 de cada elemento

Se eliminan de entre ellos los que son Tabú y están en la Lista

Tabú

soluc_vecindario

Calculamos la Z para cada uno de los vecinos

Se quita de la clasificación el elegido que tenga penalización...

De todos los vecinos, elijo el que tiene el Optimo Local (menor Z)

```

Guardo este vector nuevo como Tabu
Añado la posición variada en la Lista de Penalizaciones
      (con PENALIZACIÓN DE 3 y Resto 1 a toda las demás
penalizaciones)

```

```

-----
si el resultado es mejor sigue dentro del while
end
-----

```

III.2. MACRO DEL MODELO MICROSCÓPICO PROPUESTO DE UBICACIÓN DE PARADAS DE BUS.

```

from PyANGApp import *
from PyANGBasic import *
from PyANGKernel import *
from PyANGAimsun import *

#-----DEFINICION DE FUNCIONES-----
#-----

# funcion que almacena las paradas del modelo activo
def AlmacenaParadas( model ):
    paradaItem = list()
    paradaType = model.getType( "GKBusStop" )
    for paradas in model.getCatalog().getObjectsByType( paradaType ).itervalues():
        print "Id: %i" % (paradas.getId())
        paradaItem = paradaItem + [paradas.getId()]
    return paradaItem

def AlmacenaLineas( model ):
    LineasItem = list()
    lineaType = model.getType( "GKPublicLine" )
    for lineas in model.getCatalog().getObjectsByType( lineaType ).itervalues():
        print "Id: %i" % (lineas.getId())
        LineasItem = LineasItem + [lineas.getId()]
    return LineasItem

```

```

def AlmacenaReplicaciones( model ):
    replicacionesItem = list()
    replicationType = model.getType( "GKReplication" )
    for replicaciones in model.getCatalog().getObjectsByType( replicationType
).itervalues():
        print "Id: %i" % (replicaciones.getId())
        replicacionesItem = replicacionesItem + [replicaciones.getId()]
    return replicacionesItem

# funcion que desactiva una parada y simula el sistema
def desactiva_simula(model , replication_id , parada_id , lineaList):
    parada = model.getCatalog().find(parada_id)
    for lineas_id in lineaList:
        lineas = model.getCatalog().find(lineas_id)
        lineas.removeStop(parada)
    replication1 = model.getCatalog().find(replication_id)
    plugin = GKSystem.getSystem().getPlugin( "GGetram" )
    simulator = plugin.createSimulator( model )
    simulator.addSimulationTask( replication1, eBatch )
    simulator.simulate()
    return parada

def simula(model,replication_id):
    replication1 = model.getCatalog().find(replication_id)
    plugin = GKSystem.getSystem().getPlugin( "GGetram" )
    simulator = plugin.createSimulator( model )
    simulator.addSimulationTask( replication1, GKReplication.eBatch )
    simulator.simulate()

# funcion que añade una nueva replicacion
def createReplication( model,replication_1 ):
    #Creacion de la nueva replicacion
    replication_2 = GKSystem.getSystem().newObject( "GKReplication" ,model)
    #Sets parameters.
    replication_2 = replication_1
    replication_id_2 = (replication_1.getId() + 1)
    replication_2.setId(replication_id_2,model)
    replication_2.setDBId(replication_id_2+1)
    #Adds detector to model.
    replication_2.addToCatalog()
    return replication_2

def eliminaParadas(model,LineasItem,ParadasItem):
    for paradasId in ParadasItem:

```

```

parada = model.getCatalog().find(paradasId)
for lineasId in LineasItem:
    lineas = model.getCatalog().find(lineasId)
    lineas.removeStop(parada)

```

```

def creaParadas(model,LineasItem,ParadasItem):
    for paradasId in ParadasItem:
        parada = model.getCatalog().find(paradasId)
        for lineasId in LineasItem:
            lineas = model.getCatalog().find(lineasId)
            lineas.addStop(parada)

```

```

def addParadas(model,LineasItem,Parada):
    for lineasId in LineasItem:
        lineas = model.getCatalog().find(lineasId)
        lineas.addStop(parada)

```

```

def creaSecuencia( vector_posibilidades ):
    cont = 0
    pos = vector_posibilidades
    l_pos = len(pos)
    resul = 1
    dato = 1

    for a in pos:
        resul = resul*a

    num_posibilidades = range(l_pos)
    num_valores = range(resul)

    conta1 = range(resul)
    conta2 = range(l_pos)
    resul1 = range(resul)
    resul2 = range(l_pos)

    for j in num_posibilidades:
        dato = dato*pos[j]
        for i in num_valores:
            num = float(float(i)/float(dato))
            valor = num - int(num)
            if valor == 0:
                cont = cont + 1
            conta1[i] = (cont - 1)

```

```

        if i == (resul - 1):
            conta2[j]=conta1[:]
    cont = 0

    for j in num_posibilidades:
        dato = pos[j]
        for i in num_valores:
            if j == 0:
                d1 = float(i)
                d2 = int(float(i)/float(dato))
                resul1[i] = int(d1 - d2*float(dato) + 1)
            else:
                d1 = conta2[j-1][i]
                d2 = int(float(d1)/float(dato))
                resul1[i] = int(d1 - d2*float(dato) + 1)
        resul2[j] = resul1[:]

    return resul2

def crea_media(replicaciones,model,experimento_id):
    model = GKSystem.getSystem().getActiveModel()
    average = GKSystem.getSystem().newObject( "GKExperimentResult",model)
    num_replicaciones = len(replicaciones)
    vector_num_replicaciones = range(num_replicaciones)
    for r in vector_num_replicaciones:
        repl = model.getCatalog().find(replicaciones[r])
        average.addReplication( repl )
    experiment = model.getCatalog().find( experimento_id )
    experiment.addReplication( average )
    # take and calculate the average
    if average != None and average.isA( "GKExperimentResult" ):
        #Calculate and store in the database the average of all the simulated
        #replications in a given experiment result.
        GAimsunAvgCalculator().calculateAverage( average )
        GAimsunReplicationRetriever().retrieve( average )
    # Be sure that we reset the UNDO buffer after a non undoable modification
    model.getCommander().addCommand( None )

#-----PROGRAMA PRINCIPAL-----
-
#-----
#-----DATOS INTRODUCIDOS POR EL USUARIO-----

```

```

#-----
# listas que contienen las posibilidades de cada una de las paradas.
parada1 = [1258,1261]
parada2 = [1259]
parada3 = [1264,1265,1267]
parada4 = [1263]
parada5 = [1269]
parada6 = [1268]
parada7 = [1271,1723]
parada8 = [1270]
parada9 = [1276,1275]
parada10 = [1274]
parada11 = [1281,1282,1280]
parada12 = [1277]
parada13 = [1284]
parada14 = [1285]
parada15 = [1288,1290]
parada16 = [1287]

todasParadas=[parada1,parada3,parada7,parada9,parada11,parada15,parada16,parada2,
parada4,parada5,parada6,parada8,parada10,parada12,parada13,parada14]

vector_posibilidades = [2,3,2,2,3,2,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1]

numeroParadas = 16
numeroPosibilidades = 8
-----PROCESOS DE LA MACRO-----
-----
model = GKSystem.getSystem().getActiveModel()

p = AlmacenaParadas( model )
l = AlmacenaLineas( model )
eliminaParadas(model,l,p)

# listas que contienen las posibilidades de cada una de las paradas.

resul2=creaSecuencia( vector_posibilidades )
replicaciones = AlmacenaReplicaciones( model )

# parte que genera las combinaciones y las simula

listaParadas = range(numeroParadas)
listaPosibilidades = range(numeroPosibilidades)

```

```
ids = list()
todas_ids = list()
eliminaParadas(model,l,p)
replication_1 = model.getCatalog().find(replication_id)
pos = 0
lista_replicaciones = []

for i in listaPosibilidades:
    eliminaParadas(model,l,p)
    for j in listaParadas:
        posicion = resul2[j][i]
        id = todasParadas[j][posicion-1]
        ids = ids + [id]
    creaParadas(model,l,ids)
    cont = 0
    while (cont <= 1 ):
        simula(model,replicaciones[pos])
        cont = cont + 1
        lista_replicaciones = lista_replicaciones + [replicaciones[pos]]

        pos = pos + 1
    print lista_replicaciones
    crea_media(lista_replicaciones,model,808)
    lista_replicaciones = []

print pos
print listaPosibilidades

print "todo correcto"
```
