

MODELACION DE LAS INTERACCIONES EN PARADEROS DE BUSES

Rodrigo Fernández

Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile
Casilla 228-3, Santiago
Tel: 6894206; Fax: 6712799

Nicholas Tyler

Centre for Transport Studies, University College London
Gower Street, London WC1E 6BT
Tel: 44-171-3911562; Fax: 44-171-3835580

RESUMEN

A diferencia de sistemas operados con control central (ferrocarriles, metros, etc) el patrón de llegadas de los buses a un paradero no es uniforme. Intersecciones semaforizadas, demoras en paraderos anteriores, etc, hacen de las llegadas una variable aleatoria. La combinación de este patrón con la llegada de pasajeros al propio paradero, producto de las actividades adyacentes, produce a su vez salidas de carácter variable. Esto genera interacciones entre paraderos y con el entorno que redundan en su operación. En paraderos compuestos de puntos de parada diferenciados y cercanos -paraderos divididos- la aleatoriedad en las llegadas y salidas de cada punto da lugar, entre otros, a fenómenos de entrecruzamiento. Se producen entonces interacciones dentro del paradero que también tienen efecto sobre su eficiencia.

Como parte de una investigación destinada a modelar estos fenómenos, este trabajo da a conocer los avances logrados. Muestra cómo se ha tratado el problema con anterioridad y propone una estrategia de análisis.



1. INTRODUCCION

Los sistemas de buses dan cuenta de un porcentaje no despreciable de los viajes motorizados que se realizan diariamente en las ciudades (12% en Londres, 63% en Santiago), siendo los paraderos el lugar de encuentro entre usuarios y vehículos. Éstos generan más demoras a los buses que las encontradas en intersecciones o en tramos de calles. En particular, cuando convergen moderadas a altas demandas de pasajeros y flujos de buses, cosa que ocurre en los principales corredores urbanos. Las demoras en un paradero pueden variar desde unos 30 segundos a algunos minutos por bus, dependiendo de su demanda y modalidad de operación (Gibson y Fernández, 1995). Esta última cifra es bastante mayor a la demora producida en una intersección. Así, se ha demostrado que un adecuado diseño de paraderos contribuye a disminuir el tiempo de viaje de los pasajeros.

Como resultado de lo anterior, la importancia de modelar y diseñar adecuadamente los paraderos de buses aparece como la clave para mejorar el sistema de buses desde una perspectiva microscópica. Al respecto, hay algunos avances parciales que han proporcionado herramientas para enfrentar el problema (Baeza y Gibson, 1989; Cade-Idepe, 1988; Dextre, 1992; Elaluf, 1994; Fernández, 1993; Gibson et al, 1989; Gibson y Fernández, 1995; Tyler, 1992).

El patrón de llegadas de los buses a un paradero no es uniforme. La existencia de intersecciones semaforizadas y las demoras experimentadas en paraderos anteriores, entre otras, hacen de las llegadas una variable aleatoria. La combinación de este patrón con el arribo de pasajeros al propio paradero, dependiente de las actividades en sus inmediaciones, produce a su vez salidas de carácter variable. Esto tiende a generar interacciones entre paraderos y con el entorno que redundan en su operación. En paraderos compuestos de puntos de parada diferenciados y cercanos, la aleatoriedad en las llegadas y salidas de cada punto da lugar a entrecruzamientos, bloqueos, colas, etc. Se producen entonces interacciones al interior del paradero que también tienen efecto sobre su eficiencia.

Es por lo tanto necesario un mejor entendimiento de las interacciones al interior de los paraderos, así como entre ellos y el entorno, para incorporarlo al diseño de facilidades a los buses. Como parte de una investigación destinada a modelar estos fenómenos, este trabajo da a conocer algunos avances logrados en este sentido; muestra cómo se ha tratado el tema con anterioridad y propone una estrategia para abordar el problema.

En lo que sigue, se hace una revisión exhaustiva de la modelación de fenómenos en paraderos. Luego se plantea una estrategia de tipo inductivo para abordar el análisis de interacciones. Finalmente, se hacen algunos comentarios y se plantean los lineamientos futuros.

2. MODELACION DE FENOMENOS EN PARADEROS

2.1 DEFINICIONES Y CONCEPTOS

Un paradero es un dispositivo destinado facilitar el encuentro entre pasajeros y buses en las vías urbanas. Como tal, está compuesto de dos partes (Baeza y Gibson, 1989):



- (a) **El área de parada:** porción de la plataforma vial destinada a la detención de los buses; puede estar constituida por uno o más puntos de parada (**subparaderos**), cada uno de ellos con uno o más sitios o lugares de detención.
- (b) **El andén:** porción de la plataforma vial donde los pasajeros pueden esperar a los buses y donde las operaciones de subida y bajada de pasajeros tienen lugar; puede ser parte de la vereda o bien una isla peatonal.

Las áreas de parada y andenes pueden ser dispuestos de diferentes maneras para atender a los flujos de buses y demandas de pasajeros. Si ambos son bajos, bastará un **paradero simple** compuesto de un solo punto de parada con uno o más sitios. Conforme la demanda aumenta, habrá que generar un **paradero dividido** formado por dos o más subparaderos con dos o más sitios cada uno, ubicados en forma secuencial o paralela.

Al igual que en cualquier elemento de infraestructura de transporte donde ocurren interacciones entre usuarios (vías, intersecciones, terminales), uno de los aspectos más importantes de la modelación es su capacidad. Las consecuencias de una capacidad finita de los paraderos son la formación de colas y la generación de demoras. Éstas dependen del grado de saturación X_b del área de parada:

$$X_b = \frac{q_b}{Q_b} \quad (1)$$

donde:

Q_b = capacidad del área de parada (buses/h)

q_b = flujo de buses *que pasa* por el área de parada (buses/h)

El grado de saturación constituye entonces la clave para el diseño físico y operacional de paraderos.

Debido a que los paraderos se localizan normalmente en la calzada, su capacidad puede ser relacionada con otros dispositivos ubicados en la calzada y que tienen una capacidad finita para atender a los usuarios. Es el caso de las intersecciones. La capacidad del acceso a una intersección se define como el máximo número de vehículos por unidad de tiempo que puede pasar a través de ella. Esta definición es equivalente a decir que la capacidad del acceso a una intersección es el máximo número de vehículos que puede **entrar** a la intersección. Este número está relacionado con el intervalo medio entre vehículos cuando hay cola en esa entrada de la intersección:

$$Q_i = \frac{3600}{h} \quad (2)$$

donde:

Q_i = capacidad de una intersección (veh/h)

h = intervalo medio entre vehículos (s)



De acuerdo a lo anterior, la capacidad de un paradero puede definirse como el **máximo número de buses por unidad de tiempo que puede entrar al área de parada** (Gibson et al, 1989). Contrariamente a lo que ocurre en las intersecciones, la capacidad no está sólo ligada al intervalo medio entre buses cuando hay cola a la entrada del paradero. La función principal de un paradero es permitir que los buses puedan detenerse, en lugar de simplemente cruzar el área de parada. Es el caso de otros terminales de transporte tales como estaciones de ferrocarril, puertos y aeropuertos. Como resultado, el máximo número de buses que puede entrar al paradero está relacionado con el tiempo durante el cual el área de parada está ocupada por buses. Luego, su capacidad queda dada por:

$$Q_b = \frac{3600}{t_o} \quad (3)$$

donde:

Q_b = capacidad del paradero (buses/h)
 t_o = tiempo de ocupación del área de parada (s)

El tiempo durante el cual el área de parada permanece ocupada depende de un número de factores: tiempo de frenado y aceleración de los buses, tiempo detenido para mover pasajeros, demoras al interior del área de parada, tiempo que le toma a un bus recorrer el paradero. Así, si el área de parada está aislada de otras restricciones y compuesta de un solo sitio, su tiempo de ocupación será:

$$t_o = t_e + t_p + \frac{I}{S} \quad (4)$$

donde:

t_e = tiempo de frenado y aceleración (s)
 t_p = tiempo detenido por movimiento de pasajeros (s)
 S = flujo de saturación de la pista del paradero (bus/s)

Por su parte, si el área de parada tiene más de un sitio dispuesto linealmente y hay disciplina FIFO, el sitio que impide el acceso será el último. En tal caso, la Ec.(4) puede generalizarse como sigue:

$$t_o = \frac{t_b}{n} + \frac{I}{S} \quad (5)$$

donde:

n = número medio de buses que puede entrar al área de parada ($\leq n^\circ$ sitios)
 $t_b = t_e + t_p + t_e$ = tiempo de bloqueo del último sitio (s)
 t_e = demoras internas (s)

Las componentes de t_b están relacionadas entre sí y con variables de operación del paradero. El tiempo total de aceleración y frenado estará condicionado por el tipo de buses que sirven el paradero:

$$t_e = \frac{v_r}{y} \quad (6)$$

donde:

t_e = tiempo perdido por frenado y aceleración (s)

v_r = velocidad recorrida del bus (m/s)

y = media armónica de las tasas de aceleración y frenado (m/s^2)

El tiempo detenido por movimiento de pasajeros depende de la demanda del paradero, a través de la cantidad de pasajeros que suben y/o bajan de un bus en cada una de las detenciones que éste haga en el área de parada. Si las subidas y bajadas por cada puerta del bus son sucesivas, este tiempo puede expresarse como:

$$t_p = B_o + \max_i \{B_1 p_{sl} + B_2 p_{bl}\} \quad (7)$$

donde:

t_p = tiempo detenido por movimiento de pasajeros en cada detención (s)

p_{il} = número de pasajeros que hace la operación i (subida, bajada) por la puerta l (pax)

B_o = tiempo muerto por detención (s)

B_1 = tiempo marginal de subida (s/pax)

B_2 = tiempo marginal de bajada (s/pax)

Las demoras internas se deben a fenómenos de congestión al interior 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. En el caso de un paradero operando con disciplina FIFO, depende del tiempo de bloqueo del espacio aguas abajo (t_{bn-1}). Éste depende a su vez del tiempo perdido por frenado y aceleración y del movimiento de pasajeros -si lo hay- en ese lugar, así como del tiempo de bloqueo de aguas abajo.

2.2 SIMULACION SECUENCIAL

Los fenómenos detallados en la sección anterior conforman un complejo proceso estocástico de interacción entre pasajeros y buses al interior del paradero. Como resultado, su capacidad estará fuertemente influida por dos variables: el número de detenciones que realiza cada bus en el área de parada y la cantidad de pasajeros que sube y/o baja de ese bus cada vez que se detiene. Conocidas ambas, así como los parámetros de la Ec.(7), es posible estimar la capacidad mediante un proceso de simulación microscópica secuencial.

Se puede asumir que tanto el número de detenciones por bus como la cantidad de pasajeros transferidos en cada una, son variables aleatorias, discretas y acotadas. La modelación sigue entonces el proceso que se resume a continuación (Baeza, 1989; Gibson y Baeza, 1989).

Los datos son aquellos normalmente disponibles de terreno o como variables de diseño: **DS**, **DB**: demanda total de pasajeros que suben y bajan en el paradero (pax/h); **q_p**: flujo de buses que se detiene en el área de parada (buses/h); **MD**: número medio de detenciones por bus para mover pasajeros (det/bus); **L_j**: proporción de detenciones tipo j (subir, bajar, subir y bajar); **W_i**, **E_i**: parámetros que respectivamente relacionan lo que ocurre entre detenciones bifuncionales (para subir y bajar) y unifuncionales (para subir o bajar), y entre las primeras y restantes; **H**: longitud del período de análisis (h).

Dado MD, se puede obtener el número de detenciones que realiza cada bus (**D_k**) y el número de éstas según tipo (**D_j**). Para el primero, se usa una función de distribución geométrica truncada de rango R y moda igual a 1 (ver Baeza, 1989).

$$R = [1, \min\{N, T \cdot MD\}] \quad (8)$$

donde:

N = número de sitios del paradero

T = razón entre el máximo y la media de detenciones

Las detenciones según tipo se obtienen de los datos. Así, es posible calcular las detenciones por tipo y por bus (**D_{jk}**) como un proceso de asignación:

$$\begin{aligned} \sum_j \sum_k D_{jk} &= TD \\ \sum_k D_{jk} &= D_j \\ \sum_j D_{jk} &= D_k \end{aligned} \quad (9)$$

donde:

TD = MDq_pH = número total de detenciones en el periodo (det)

D_j = L_jTD = número de detenciones por tipo (det)

D_k = número de detenciones por bus (det)

Conocido **D_{jk}**, se calcula la media de pasajeros que suben o bajan por clase de detención (**MP_{ijk}**) mediante el siguiente sistema de ecuaciones

$$\begin{aligned} H \cdot DS &= \sum_{j \neq b} \sum_k MP_{ijk} D_{jk} \\ H \cdot DB &= \sum_{j \neq s} \sum_k MP_{ijk} D_{jk} \\ MP_{isbk} &= E_i MP_{iik} \\ MP_{iin} &= W_i MP_{iil} \end{aligned} \quad (10)$$

donde i=s,b; j=s,b,sb; k=1,n.

Con esto se puede estimar la cantidad de pasajeros que hacen una determinada operación por clase de detención (P_{ijk}) mediante otra función de distribución geométrica truncada, cuyo rango R está dado por:

$$R = [I, T_i \cdot MP_{ijk}] \quad (11)$$

donde T_i es la razón entre el máximo y la media de pasajeros que hacen la operación i .

Finalmente, se utiliza un modelo de uso de puertas para obtener la cantidad de pasajeros que sube o baja por cada una (p_{id}). Se postula que todas las subidas se hacen por la puerta delantera del vehículo; o sea, $p_{sd}=P_s$. El uso de puertas por los pasajeros que bajan puede entonces modelarse como:

$$\begin{aligned} P_b &= p_{bd} + p_{bt} \\ p_{bd} &= C + K P_b \end{aligned} \quad (12)$$

donde:

- P_b = número total de pasajeros que bajan
- p_{bd} = número de pasajeros que baja por puerta delantera
- p_{bt} = número de pasajeros que baja por puerta trasera
- K = proporción que baja por la puerta delantera
- C = constante

2.3 SIMULACION PARALELA

Una alternativa a la forma de abordar el problema presentada más arriba fue explorada por Elaluf (1994). Ésta se basa en una simulación microscópica de las operaciones en paraderos, basada en *transputers*. Su objetivo fue determinar si la arquitectura paralela de modelación podía dar cuenta adecuadamente estos fenómenos. Para ello, se definen un par de conceptos simples pero útiles para estudiar interacciones en paraderos: **sectores** y **bloques** (Fig. 1).

Un **sector** es una porción del área de parada o del andén que puede respectivamente ser ocupada por buses o pasajeros. Puede estar lleno o vacío, si hay o no vehículos o personas en él. Los sectores transmiten, mediante canales de comunicación, su condición a sectores adyacentes. Los sectores de buses lo hacen en el sentido de la circulación. Si alguno se encuentra vacío, puede recibir al bus que estaba en el sector de aguas arriba. De otro modo, éste debe permanecer en su sector y se le imputa una demora interna (t_c). Los sectores de pasajeros transmiten al sector de bus inmediato la cantidad de éstos que se transfieren; se calcula así el tiempo detenido por pasajeros (t_p).

Un **bloque** es un conjunto de sectores de buses y pasajeros que permite representar en forma modular todo el paradero. Un paradero simple de un solo sitio podrá simbolizarse como un bloque compuesto de un sector de pasajeros (el andén) y dos de buses (el sitio y la porción correspondiente de la pista adyacente). Así, un paradero más complejo -de sitios múltiples o con varios subparaderos- puede modelarse juntando estos bloques elementales.



Cada bloque se puede poner en un *transputer* -un microcomputador elemental interconectado con otros similares- para determinar independientemente lo que ocurre en cada sección del paradero. Cada cierto tiempo, los *transputers* se comunican entre sí para evaluar el estado de la modelación y sacar consecuencias de él. Esto permite una arquitectura computacional flexible para la simulación.

Aunque la aproximación al problema de interacciones en paraderos mediante computación paralela es una contribución significativa, se ha concentrado más bien en consideraciones computacionales antes que conceptuales. Los experimentos realizados hasta la fecha han tenido como objetivo sólo mostrar con éxito su factibilidad operativa, soslayando para tal efecto aspectos de modelación como los mencionados en la sección anterior.

3. ESTRATEGIA PARA MODELAR INTERACCIONES EN PARADEROS

La meta a largo plazo de la modelación de interacciones en y entre paraderos es disponer de un modelo de red para transporte público de superficie, que sirva al diseño de sistemas de buses de alta capacidad (Fig.2). Para alcanzarlo, se ha planteado una estrategia inductiva que se detalla a continuación, basada en el logro de ciertos objetivos específicos.

El primer paso es la modelación de un paradero simple y aislado, al cual accede una demanda moderada de pasajeros a tasa constante durante algún período. Este aspecto ha sido abordado por el modelo de simulación IRENE hasta su versión 2.51 (Beckett, 1990).

En segundo lugar, es necesario incorporar las peculiaridades en la modelación que introduce en este tipo de paraderos, o en subparaderos supuestos como elementos aislados, la existencia de altos niveles de demanda de pasajeros. Para ello, se ha investigado el comportamiento en algunos paraderos de alta demanda en Santiago (Fernández et al, 1995). Los resultados se están validando con nuevas observaciones para incorporarlos a futuras versiones de IRENE.

El tercer objetivo consiste en analizar en detalle las interacciones que ocurren entre un paradero simple o subparadero aislado y la intersección aguas arriba. Al respecto, la versión 2.52 del modelo IRENE, recientemente desarrollada, constituye la herramienta disponible. A partir de ella, se han obtenido interesantes resultados (Gibson y Guerrero, 1995).

La ligazón entre un paradero simple y la intersección de aguas abajo es luego la etapa siguiente. El substrato teórico de tal relación, así como los algoritmos para su modelación ya han sido desarrollados (Guerrero, 1995). Resta su incorporación en IRENE para realizar experimentos y evaluar sus efectos bajo diferentes condiciones.

Estudiar lo que ocurre dentro de un paradero dividido constituye el quinto objetivo. Esto significa modelar las interacciones entre dos subparaderos con independencia del entorno. Los fenómenos que allí tienen lugar pueden tratarse usando los conceptos de bloques y sectores detallados en 2.2. Una primera aproximación a este problema es comentada en Fernández (1994).



Conocidos los efectos al interior de un paradero dividido, se puede considerar una red elemental de éstos. Es decir, dos de ellos conectados entre sí, o bien con intersecciones aguas arriba y/o abajo, aprovechando los desarrollos previos.

Finalmente, el entorno urbano puede ser incorporado mediante demandas de pasajeros dependientes del sistema de actividades y de su dinámica autónoma. Esto permitiría considerar demandas variables en el tiempo y analizar su conexión entre paraderos contiguos, así como estimarla para escenarios hipotéticos.

De entre los objetivos específicos de la modelación de interacciones en paraderos, los tres últimos - interacciones en paraderos divididos, entre éstos, y con el entorno- son los que restan explicar conceptualmente. En el resto de los casos, existen avances que deben ser depurados con nuevas evidencias experimentales. Es la etapa en que se encuentra actualmente la modelación.

4. COMENTARIOS

El análisis de fenómenos en paraderos se ha concentrado fundamentalmente en lo que ocurre con paraderos o subparaderos aislados (Baeza, 1989; Baeza y Gibson, 1989; Fernández et al, 1995). La relación explícita con intersecciones cercanas ha empezado a incorporarse en el análisis (Gibson y Guerrero, 1995; Guerrero, 1995). No obstante, no se investigado aún la interacción dentro de paraderos divididos. El enfoque de Elaluf (1994), con las limitaciones señaladas en 2.2, podría ser susceptible de acomodarse a este estudio. En particular, si aprovecha su aporte conceptual de modelación modular mediante sectores y bloques insinuado en Fernández (1994).

Recientes esquemas de paraderos divididos en Santiago (Alameda, Providencia, Av.Grecia, San Diego, etc) muestran que la relación entre subparaderos puede llegar a ser más estrecha, en términos de su operación, que la supuesta en sus diseños.

Observaciones en sus similares en Londres (Angel Stn, King Cross Stn, Brixton Stn, Oxford St, etc) han permitido comprobar que, aún en esa realidad, los flujos de buses y demandas de pasajeros se aproximan a los encontrados en ciudades como Santiago (150 buses/hora y 250 pasajeros/hora embarcando y desembarcando). Pero, por itinerarios, éstas se concentran en períodos de 5 minutos, seguidos de unos 10 minutos de actividad casi nula. Al no considerar esto, las recomendaciones inglesas de diseño (London Transport Planning, 1993) tienden a generar paraderos divididos sin la necesaria capacidad, con pérdidas notables de eficiencia en períodos punta de embarque de pasajeros.

En ambos casos queda claro que el principal conflicto en paraderos divididos son las maniobras de adelantamiento en su interior y su interacción con las actividades de subida y bajada de pasajeros. Se refuerza así la importancia de investigar con más detalle estas interacciones.

En vista de lo anterior, el fin de la investigación que se desarrolla es afianzar los avances sobre paraderos aislados y explorar los fenómenos al interior de paraderos divididos. Su propósito es incorporar paulatinamente estos avances al diseño.



AGRADECIMIENTOS

Esta investigación está siendo financiada por Fondecyt, mediante el proyecto 1940518. Aportes complementarios para estadías en el UCL han provenido de Fundación Andes y The British Council en Chile.

REFERENCIAS

- Baeza I. (1989) **Estimación de la capacidad de paraderos de buses**. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile, Santiago.
- Baeza I. y Gibson J. (1989) Modelación de la capacidad y demoras en paraderos de Buses. **Actas del IV Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte**, Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, 3-18.
- Beckett R. (1990) **Sistema de apoyo al diseño y modelación de paraderos de buses**. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil en Computación, Universidad de Chile, Santiago.
- Cade-Idepe (1988) **Estudio de investigación de una metodología de análisis y seguimiento de transporte público**. Intendencia Región Metropolitana, Comisión de Transporte Urbano, Santiago.
- Dextre J.C. (1992) **Simulation of bus operation along a corridor**. MSc Thesis, University of London.
- Elaluf S. (1994) **Transputer-based microscopic simulation of bus-stops operations**. MSc Thesis, University of London.
- Fernández R. (1993) An expert system for the design and location of high-capacity bus-stops. **Traffic Engineering and Control**, 34(11), November 1993, 533-539.
- Fernández R. (1994) Modelling bus-stop interactions: Review and alternative approach. **University of London Centre for Transport Studies Draft Documents** (unpublished).
- Fernández R., Gibson J. y Méndez M. (1995) Modelación del comportamiento en paraderos de alta demanda. **Documento de Trabajo ST-INV/01/95**, Sección Ingeniería de Transporte, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, Santiago.
- Gibson J., Baeza I. and Willumsen L.G. (1989) Bus-stops, congestion and congested bus-stops. **Traffic Engineering and Control**, 30(6), June 1989, 291-302.
- Gibson J. y Fernández R. (1995) Recomendaciones para el diseño de paraderos de buses de alta capacidad. **Apuntes de Ingeniería N°55**, Pontificia Universidad Católica de Chile.



Gibson J. y Guerrero G. (1995) Influencia sobre un paradero de buses de una intersección semaforizada aguas arriba. **Documento de Trabajo ST-INV/02/95**, Sección Ingeniería de Transporte, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, Santiago.

Guerrero G. (1995) **Modelo de la interacción operacional de un paradero de buses y las intersecciones semaforizadas próximas**. Memoria de Título, Departamento de Ingeniería de Transporte, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago.

London Transport Planning (1993) **Guidelines to bus stop design**, London.

Tyler N.A. (1992) **High capacity bus systems: A design methodology using artificial intelligence**. PhD Thesis, University of London.



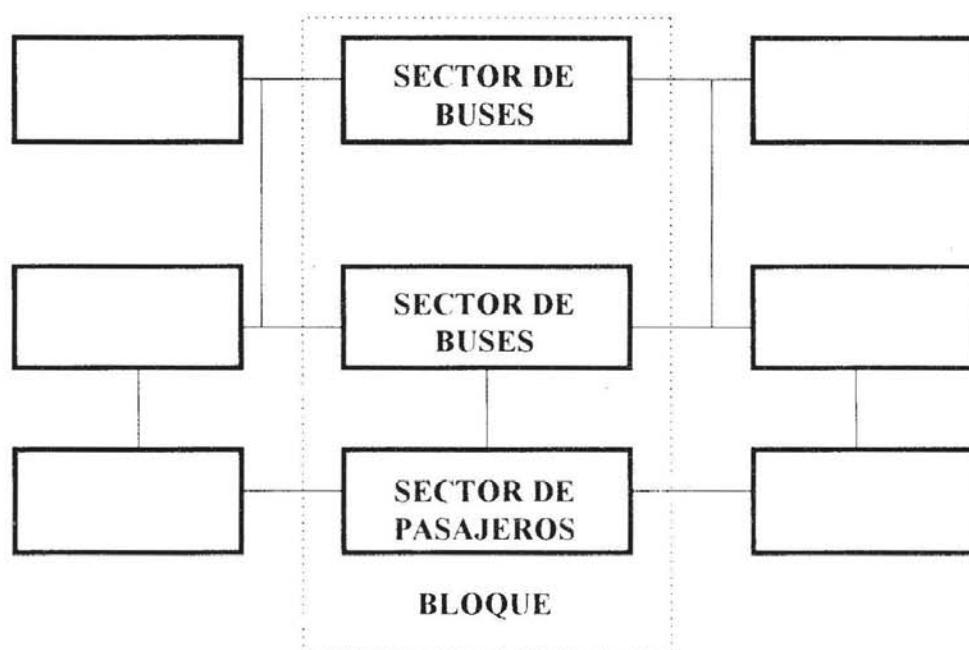


Fig.1: Modelación en base a sectores y bloques

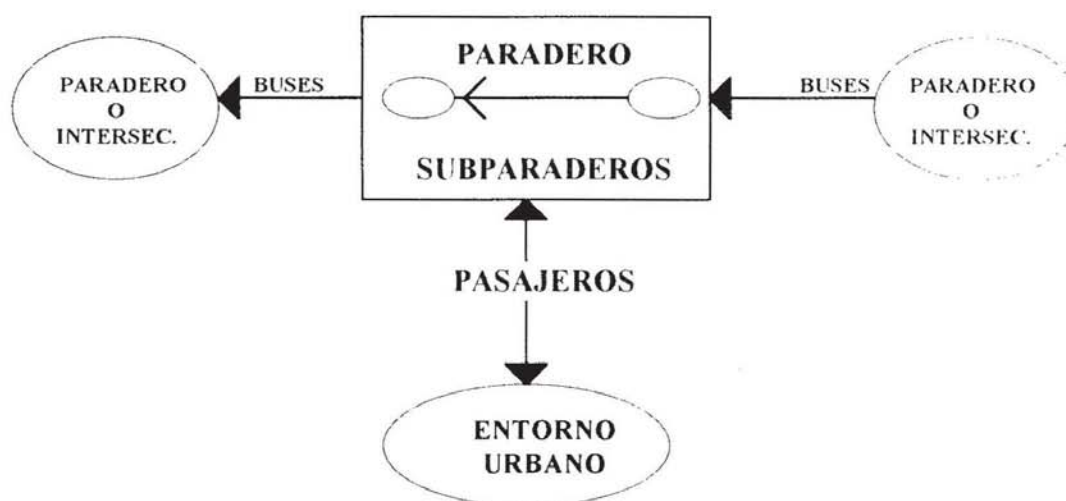


Fig.2: Modelo de red para buses