

## MODELACION DE LA CAPACIDAD Y LAS DEMORAS EN PARADEROS DE BUSES

Irene Baeza (\*) y Jaime Gibson  
Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile  
Casilla 228/3, Santiago, Chile.

### RESUMEN

El tiempo de viaje de un bus en un tramo se divide en tiempo en movimiento y demoras en intersecciones y paraderos. Donde hay altos flujos de automóviles y pocos buses las demoras en intersecciones constituyen el problema principal. Si la proporción es la contraria, las demoras en paraderos son el elemento clave. El primero se ha estudiado extensamente, mientras que para el segundo hay escasa investigación publicada.

Este trabajo trata de las interacciones que tienen lugar en los paraderos. A partir de una formalización de ellas y suponiendo que el paradero opera sólo en una pista y que los buses entran a él sin adelantarse, se genera un modelo para la capacidad, excluyendo la influencia de intersecciones contiguas. Es complementado por otros modelos que estiman la duración y cantidad de las detenciones y el número de pasajeros que sube y baja en ellas. Para modalidades simples se encuentra una solución analítica. Para situaciones más complejas el problema se resuelve a través de un programa de simulación denominado IRENE.

Finalmente, se utiliza el programa para estudiar algunos problemas típicos en calles con altos flujos de buses y se formulan recomendaciones para el diseño de paraderos.

(\*) Actualmente en CITRA LTDA.

## 1. INTRODUCCION

En los países desarrollados y en desarrollo los principales componentes del tráfico urbano son los buses y automóviles, cuya interacción origina problemas de diferente naturaleza según la proporción de cada tipo de vehículo.

Para entender esta interacción se debe considerar que además de las diferencias de tamaño entre buses y automóviles hay diferencias de operación ya que los buses tienen la peculiaridad de detenerse periódicamente a tomar o dejar pasajeros.

Como las paradas de los buses se realizan, normalmente, en las vías, surgen complejas interacciones entre buses (congestión en paraderos), entre éstos y automóviles y entre los fenómenos originados en los paraderos y los debidos a intersecciones próximas. Su importancia y características dependen de la magnitud del flujo de buses, de la demanda de pasajeros y de la forma de operación de los buses. Esta última combina variables de comportamiento de los operadores, de diseño de los vehículos y regulaciones específicas.

El conocimiento actual del problema es escaso. Existe un tratamiento que considera superficialmente la congestión en paraderos y su relación con intersecciones adyacentes (Transportation Research Board, 1985) adecuado para flujos moderados de buses, paraderos a mitad de cuadra y alta disciplina de conductores, condiciones que no reflejan la operación en calles de ciudades con altos flujos de buses, como ocurre en Chile.

Este trabajo presenta una perspectiva más amplia del problema, incorporando los casos en que hay varios buses simultáneamente en un paradero. El objetivo principal es generar un modelo para estimar la capacidad de éste y las demoras que se producen en él, para una variedad de características físicas y operacionales.

A pesar de que no se tienen en cuenta situaciones reales complicadas, como los grandes paraderos informales en que se detienen buses en dos o más pistas, la existencia de sitios múltiples de parada origina casi siempre un proceso estocástico no estacionario en el paradero. Esto dificulta la aplicación de un enfoque puramente analítico para estimar la capacidad y demoras. Se desarrolló un programa de simulación, denominado IRENE, que permite hacer esta estimación en una amplia gama de situaciones.

En el capítulo 2 se plantea un marco conceptual para abordar el problema. El capítulo 3 está destinado a la modelación de los fenómenos que ocurren en un paradero. En el capítulo 4 se discute la estimación de la capacidad y las demoras, se describe brevemente el programa IRENE y se

muestran algunos resultados obtenidos con dicho programa. Finalmente, el capítulo 5 contiene algunas consideraciones sobre el diseño de paraderos y su operación.

## 2. ANALISIS CONCEPTUAL

### 2.1 Definición de un paradero

Es un lugar en que suben y bajan pasajeros de los buses. Consta de una zona delimitada de la vereda ( andén ) y de la calzada ( área de parada ). Los buses se detienen en esta última, que puede tener uno o más espacios de detención ( sitios ). Lógicamente, el andén tiene la misma extensión.

En la definición física importa también la localización del paradero dentro de la plataforma vial, longitudinal y transversalmente. Esto es, si se ubica a mitad de cuadra o próximo a intersecciones, en el primer aspecto, y si está en la alineación normal de la vía o en un dispositivo especial ( bahía, ensanche de la vereda o espacio segregado ), en el segundo.

Así queda especificado el lugar donde está el paradero. Por cierto, es frecuente observar en países como el nuestro paraderos informales que pueden alcanzar gran tamaño en horas punta. Estos no son tratados aquí, ya que su existencia probablemente deriva de la ausencia de un diseño apropiado.

### 2.2 Proceso de ocupación

El modo en que los buses hacen uso del paradero es muy simple cuando tiene un solo sitio. Si hay más de uno, aparecen interacciones que es preciso modelar. Se dirá que un bus está ocupando el paradero mientras está dentro del área de parada.

El ingreso, permanencia y salida de un bus están condicionados por las características del área de parada, de la demanda y del comportamiento de los usuarios. El bus podrá entrar de inmediato si el último sitio está desocupado o, no estandolo, si se permite adelantar e ingresar a un sitio precedente. En caso contrario deberá esperar en la cola de entrada. Una vez en el interior del área de parada, el bus se detendrá en el sitio deseado si está libre, o esperará en el más próximo que lo esté. Es posible que el conductor quiera detenerse más de una vez a tomar o dejar pasajeros, repitiéndose el proceso anterior. Una vez que ha terminado su movimiento de pasajeros, le interesa abandonar el área de parada. Podrá hacerlo si la salida está despejada o puede adelantar a los otros buses detenidos.

La estructura del proceso de ocupación se esquematiza en la Figura 1. Es evidente que con alta probabilidad la trayectoria de un bus será dependiente de la de otros que están simultáneamente en el área de parada. Como consecuencia,

hay tres clases de detención: en cola, esperando entrar; por movimiento de pasajeros y por esperas dentro del paradero, ocasionadas por estar ocupado algún sitio que le interesa usar o por estar impedida la salida.

### 2.3 Definición de capacidad

La capacidad de un paradero puede ser entendida de varias maneras, en relación con buses o pasajeros. En este trabajo sólo se considera la capacidad de atención de buses. Por lo visto, ella varía con el mecanismo de funcionamiento interno del paradero, que afecta la cantidad y duración de las detenciones que hacen los buses. La forma consistente de definir la capacidad es como el número máximo de buses que puede entrar al paradero en las condiciones imperantes.

Entonces, la cola de entrada está regida exclusivamente por la relación flujo/capacidad. Por su parte, las detenciones por movimiento de pasajeros o por esperas internas influyen sobre el valor de la capacidad.

### 2.4 Factores determinantes de la capacidad

La capacidad está en función del modo de entrar al y salir del paradero y de su operación interna. A esto subyacen diversos factores relativos al diseño, la regulación y la demanda.

Diseño del paradero. Importa el número de sitios y el posicionamiento del área de parada en la plataforma. Más en detalle, si los sitios están dispuestos linealmente o con otra configuración ( dientes de sierra, doble andén ).

Modalidad de operación. Esta comprende varios aspectos:

- Uso del área de parada: puede ser exclusiva para los buses o que éstos la compartan con otros vehículos.
- Carácter del paradero: la detención en él es obligatoria o voluntaria. En el último caso, los buses que no paran pueden estar o no forzados a pasar por el área de parada.
- Disciplina de entrada y salida: pueden ser en fila única por andén ( FIFO ) o con adelantamiento permitido ( AP ).
- Uso de los sitios: si hay más de uno, pueden estar asignados a una línea ( o grupo de ellas ) o ser de uso indiferenciado.

Demandas de buses. Influye el flujo de buses que pasa por el área de parada y el tipo de ellos, en cuanto a tamaño, velocidad, número y tamaño de las puertas, diseño de sus áreas de acceso. También lo hacen factores de comportamiento: sistema de cobro del boleto, disposición del conductor a parar más de una vez para recoger pasajeros, uso de las puertas.

Demandas de pasajeros. Por un lado, incide la cantidad de ellos que sube y baja en cada detención. Por otro, cómo están distribuidos en el andén y el tiempo que emplean en subir o bajar.

Si bien estos factores son diferenciables no son del todo independientes. Recoger pues su influencia no es tarea fácil si se quiere representar muchas posibilidades. Conviene tener presente que algunos condicionan la estructura del proceso de ocupación (sobre todo, el diseño y la modalidad de operación) en tanto otros actúan a través de parámetros pertinentes a su duración.

En el capítulo siguiente se propone una modelación válida para un conjunto poco restrictivo de combinaciones de estos factores.

### 3. MODELO DEL PROCESO DE OCUPACION DEL PARADERO

De aquí en adelante se hará referencia solamente a paraderos con las siguientes características:

- aislado, es decir, no interferido por intersecciones aguas abajo o aguas arriba;
- configuración lineal;
- el área de parada sólo es usada por buses;
- el único efecto que pueden tener otros vehículos sobre el paradero es impedir que los buses salgan adelantando;
- disciplina de entrada FIFO;
- sitios no asignados o asignados a un grupo de líneas.

A continuación se formulan modelos en este contexto, para los componentes del proceso de ocupación.

#### 3.1 Llegadas de buses y pasajeros

Desde el punto de vista de la capacidad del paradero interesa la tasa media de llegada. Pero para estimar demoras es importante su patrón de distribución en el tiempo.

Sea el flujo de buses  $q_b$  (bus/hr). Si la detención no es obligatoria, una fracción de él no parará y, según sea la modalidad de operación, estos vehículos atravesarán o no el área de parada. Sea  $q_p$  (bus/hr) el flujo que se detiene para mover pasajeros. Entonces, el flujo que entra al paradero será  $q_b$  o  $q_p$ , dependiendo del caso. Ambas tasas se suponen conocidas.

Como se está considerando sólo paraderos aislados, hay dos distribuciones de llegada de interés. Una es a intervalo constante y la otra a intervalos distribuidos según una exponencial negativa (proceso de Poisson). Dados los supuestos, la entrada al área de parada es una fila por lo que debe acotarse el intervalo mínimo.

Entonces , las llegadas de buses serán a intervalos  $h$  dados por:

$$h = 1/x \quad (\text{seg}) \quad (1a)$$

$$F(h) = 1 - (1 - x/s) e^{[-x \cdot (h - 1/s)]}, h \geq 1/s \quad (1b)$$

donde  $x = q/3.600$  ,  $q = q_b$  ó  $q_f$  según corresponda, en (bus/hr) y  $s$  es el flujo de saturación, en (bus/seg).

La ec.(1a) se aplica si se adopta una distribución uniforme y la ec.(1b) para llegadas aleatorias.

La demanda de pasajeros está compuesta por aquellos que suben y los que bajan en el paradero. Sean  $P_g$  y  $P_b$ , respectivamente, en (pax/hr). Se supondrá que los pasajeros que suben llegan al paradero a tasa constante. Como se descarta el caso en que cada sitio está asignado a líneas específicas, se desprende que no hay una segmentación de estos pasajeros entre los sitios.

### 3.2 Detenciones de los buses

Las no endógenas al proceso de ocupación son las que se realizan por movimiento de pasajeros. En rigor, un bus se detendrá si algún pasajero quiere bajar o alguno quiere subir y el conductor está dispuesto a tomarlo. Dependiendo del tipo de paradero, puede haber detenciones en más de un sitio de un mismo bus y éstas tener lugar en cualquiera de ellos. El fenómeno es en sí muy complicado de representar. El enfoque adoptado es que el número medio de detenciones para mover pasajeros por bus que lo hace, es conocido ( $\bar{N}D$ ). La cantidad total de detenciones en un período  $T$ ,  $ND$ , será:

$$\bar{N}D = \bar{N}D \cdot q_p \cdot T. \quad (2)$$

Pero hay que determinar qué bus para en cada sitio y qué hace en él. Se define la variable  $D_{ik}$ , que representa el número de detenciones del bus  $i$  en las que hace la operación  $k$  ( $k=1$  es sólo subir pasajeros;  $k=2$ , sólo bajar y  $k=3$ , subir y bajar). Obviamente,  $\sum_i \sum_k D_{ik} = ND$ . La distribución de las operaciones es también un proceso complicado, altamente influido por variables de comportamiento ( Gibson, 1984 ), por lo que se supone que se conoce  $ND_k = L_k \cdot ND$ , donde  $L_k$  es el porcentaje de detenciones tipo  $k$  en el total.

Por otra parte, el número de detenciones por bus en el paradero puede ser tratado como variable aleatoria si su media es mayor que 1. Su distribución es discreta y doblemente acotada: inferiormente no puede ser menor que uno, puesto que

la población es de buses que paran; superiormente no puede ser mayor que el número de sitios. Gibson y Muñoz ( 1983 ) proporcionan datos a los que se ajusta bien una distribución geométrica truncada superiormente; esta cota puede manejarse como parámetro ( Baeza, 1989 ). De esta manera puede determinarse  $D_{ik}$ , verificándose que  $\sum_i D_{ik} = ND$ .

Determinar  $D_{ik}$  conociendo  $ND_i$  y  $ND_k$  es un problema de asignación estándar. Luego,  $D_{ik}$  resulta de aplicar el algoritmo de Krwithof, corrigiendo para respetar el número máximo de detenciones por bus, las sumas  $ND_i$  y  $ND_k$  y que  $D_{ik}$  es entero.

En seguida, cada detención debe ser asignada a un sitio. Si el comportamiento especificado es que el conductor usa el sitio más próximo a la salida, la asignación es elemental. Si los sitios son de uso indiferenciado este proceso se realiza por medio de una variable muda  $d_{ijk}$  ( donde  $\sum_j d_{ijk} = D_{ijk}$  ) que vale uno si el bus  $i$  se detiene en el sitio  $j$  para realizar la operación  $k$  y cero en otro caso. Teniendo en cuenta que un bus a lo sumo se detiene una vez para mover pasajeros en un sitio determinado y suponiendo que los conductores no tienen preferencia por sitios, es fácil determinar  $d_{ijk}$ . El supuesto es sostenible porque el caso en referencia corresponde a paraderos en que los pasajeros están diseminados en el andén.

Nótese finalmente que las detenciones por haber cola de entrada o por esperas internas son endógenamente determinadas y son adicionales a las producidas por operaciones de movimiento de pasajeros.

### 3.3 Duración de las detenciones por pasajeros

Es sabido que esta duración depende del número de pasajeros que suben y bajan y de la manera en que lo hacen ( cantidad y uso de las puertas ). Un modelo que ha dado buenos resultados en otros lugares ( véase Lindau, 1984 y Guenthner y Hamat, 1988 ) es:

$$tp = \beta_0 + \max_q \{ \beta_1 \cdot ps_q + \beta_2 \cdot pb_q \} \quad (3)$$

donde  $tp$ = tiempo de parada, en segundos;  
 $ps_q$  y  $pb_q$ = número de pasajeros que sube y baja por la puerta  $q$  en la detención;

$\beta_0$ = tiempo muerto ( por apertura y cierre de puertas, por ej.), en segundos;

$\beta_1, \beta_2$ = tiempo de subida o bajada de un pasajero, en segundos.

Los parámetros  $\beta_0$ ,  $\beta_1$  y  $\beta_2$  varian según el tipo de bus y factores de comportamiento y pueden ser calibrados en terreno.

Es necesario determinar  $p_{sq}$  y  $p_{bq}$ . Esto es, asignar la demanda total (conocida) a cada detención y luego a cada puerta. Para el primer problema hay que tener en cuenta el tipo de detención (no hay subidas si  $k=2$  ni bajadas si  $k=1$ ) y su número para un cierto bus. Es posible que haya tendencia a un mayor movimiento de pasajeros en la primera detención del bus o bien que el número de pasajeros que sube o baje en una detención bifuncional difiera del típico de detenciones unifuncionales, por obstrucción si hay uso combinado de alguna puerta. Se definen parámetros  $\epsilon_s$  y  $\epsilon_b$  que representan el cuociente entre la tasa media en operación bifuncional y unifuncional, así como  $w_s$  y  $w_b$  que son los homólogos entre las tasas para las detenciones posteriores a la primera y la de ésta. Normalmente el valor de estos parámetros es  $\approx 1$ .

Dados estos parámetros, el número de detenciones por operación, clasificadas en primeras y restantes, y la demanda total de pasajeros en el período se puede formular un sistema de ecuaciones para calcular las tasas medias de subida y bajada para cada clase de detención. El número de pasajeros para una cierta detención es una variable aleatoria cuya media es la tasa correspondiente. Datos recolectados en algunos paraderos de Santiago (Gibson y Muñoz, 1983; CADE-IDEPE, 1988) sugieren que dichas variables siguen bien una distribución geométrica truncada, cuya cota máxima es otro parámetro.

Mediante esta distribución se hace la asignación de pasajeros a cada detención. Una explicación más detallada puede encontrarse en Baeza (1989). La distribución entre puertas es sencilla, una vez especificada su cantidad y función.

### 3.4 Detenciones endógenas

El supuesto de disciplina FIFO de entrada implica que sólo se puede ingresar al área de parada si al llegar el bus el último sitio está desocupado. En caso contrario, deberá detenerse y permanecer en cola hasta que se despeje la entrada. La descarga de la cola se hace, como es usual, a la tasa definida por el flujo de saturación. Eso sí, se descarga cada vez un número entero de buses que es a lo sumo igual al número de sitios consecutivos libres. Dado este proceso, es fácil calcular la duración de la estadía en la cola. La dificultad radica en determinar cuándo se desocupa el último sitio y si hay otros disponibles en ese momento.

Similar es el tratamiento de las esperas internas. Definido en qué sitio se detendrá cada bus para mover pasajeros y el tiempo que estará detenido, se puede trazar el camino que seguirá un bus dentro del área de parada. El avance se realiza a una velocidad que es dada. Toda obstrucción lo obligará a detenerse, mientras dure, salvo que haya terminado las operaciones con pasajeros y esté permitido salir adelantando. Nuevamente la dificultad reside en determinar la

existencia y duración de las obstrucciones.

Siendo la cantidad y duración de las detenciones por pasajeros variables aleatorias, excepto en situaciones simples como paradero con sitio único, el proceso de ocupación del paradero es estocástico y sumamente complejo por haber varias combinaciones de diseño y modalidad de operación factibles. Por esta razón se descartó emprender una modelación analítica de estas detenciones, prefiriéndose la simulación.

### 3.5 Tiempo perdido por detención

Al tiempo detenido por movimiento de pasajeros o por obstrucción dentro del área de parada hay que añadir el tiempo perdido por aceleración y frenado, ya que estas etapas transientes no se modelan explícitamente. Su magnitud dependerá de la velocidad que lleve el bus al detenerse y de la que desarrolle después. Si hay más de una detención en el área de parada es lógico que el tiempo perdido sea diferente a si hay una sola por las diferencias de velocidades envueltas.

En estas condiciones, los tiempos perdidos por detención se definen de la siguiente manera :

- $t_L = t_1 + t_2$  si se trata de la primera y última detención,
- $= t_1 + t_2'$  si se trata de la primera pero no la última detención,
- $= t_1' + t_2'$  si no se trata ni de la primera ni de la última detención,
- $= t_1' + t_2$  si se trata de la última pero no la primera detención.

Los valores de  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_1'$  y  $t_2'$  derivan de relaciones físicas en que se supone que las tasas de aceleración y frenado son constantes en el tiempo. Sus expresiones son:

$$t_1 = v_0 / 2 \cdot f \quad (4)$$

$$t_2 = v_0 / 2 \cdot a \quad (5)$$

$$t_1' = \frac{a \cdot L^{\frac{1}{3}}}{(2 \cdot a^2 \cdot f + 2 \cdot a \cdot f^2)^{\frac{1}{3}}} \quad (6)$$

$$t_2' = \frac{f \cdot L^{\frac{1}{2}}}{(2 \cdot a^2 \cdot f + 2 \cdot a \cdot f^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (7)$$

donde  $v_0$  = velocidad de recorrido del bus, en [ m/seg ];  
 $a, f$  = tasas de aceleración y frenado respectivamente, en [m/seg<sup>2</sup> ];  
 $L$  = distancia que recorrió el bus entre detenciones, en ( m ).

#### 4. ESTIMACION DE CAPACIDAD Y DEMORAS

##### 4.1 Planteamiento general

Dados los supuestos de entrada FIFO y disposición lineal de los sitios cabe hacer una analogía entre el ingreso al paradero y el funcionamiento de una intersección semaforizada. Existen periodos en que la entrada está bloqueada (último sitio ocupado) a los que siguen otros en los que pueden ingresar algunos buses (según la cantidad de sitios consecutivos desocupados), que se repiten cíclicamente. Con la definición de capacidad adoptada, ésta se mide por el cuociente entre el número medio de buses que entra en un ciclo y la duración media de éste. La expresión a la que se llega en este caso es:

$$Q_p = \frac{3.600 \cdot \bar{n}}{\bar{n}/s + tb} \quad [ \text{bus/hr} ] \quad (8)$$

donde  $\bar{n}$  es el número medio de buses que entra durante un período de desbloqueo;  $s$  es el flujo de saturación de la pista donde está situada el área de parada, en ( bus/seg ), y  $tb$  es la duración media de un período de bloqueo, en segundos.

La variable  $tb$  representa la duración media de las detenciones en el último sitio del paradero. Esta es la suma del tiempo medio de parada por pasajeros y del tiempo medio detenido por espera interna ( $t_E$ ), más el tiempo perdido promedio. Aunque la primera y la última componentes son predecibles analíticamente con los modelos expuestos,  $t_E$  ofrece dificultades por ser de carácter endógeno. Salvo en paraderos de características muy simples, este proceso es estocástico y dependiente del tiempo, poco tratable por medios analíticos. Algo similar ocurre con  $n$ . En cambio, mediante simulación es siempre posible calcular ambas variables. Cualquiera sea el caso, la ec.( 8 ) es aplicable.

La estimación analítica procede, por ejemplo, en paraderos de sitio único. En ellos  $n = 1$ ,  $tb = t_p + t_L$  y  $t_E = 0$ . La estimación con simulación consiste en determinar  $n$  y  $tb$  en

cada ciclo saturado del período considerado, promediarlos e introducirlos en la  $\epsilon$ . ( 8 ).

Las demoras producidas por efecto del paradero se dividen en tres tipos:

·por espera interna, es decir, es el tiempo que un bus espera dentro del paradero para que se desocupe algún sitio en el que desea detenerse o porque la salida del paradero está bloqueada;

·por existencia de cola.producida por imposibilidad de entrar al paradero;

·por movimiento de pasajeros.

Cada una de estas demoras se calcula sumando el tiempo detenido y perdido correspondiente. Sólo la por pasajeros es siempre calculable analíticamente. La por espera interna y la por existencia de cola provienen de la simulación.

Por ser un proceso estocástico hay que simular varias veces para obtener estimadores confiables de capacidad y demoras. La demora por existencia de cola es la que tiene mayor varianza pero, disponiendo de un estimador de la capacidad, podría calcularse analíticamente con el método de Kimber y Daly (1986).

#### 4.2 El programa IRENE

El programa está escrito en TURBO PASCAL 5. Simula el comportamiento de cada bus pero sobre la base de la típica trayectoria espacio-tiempo linealizada del enfoque macroscópico. La versión actual sólo contempla un paradero aislado.

Requiere información sobre la demanda, tipo de buses y la modalidad de operación del paradero. Entrega como resultados: la capacidad del paradero, si hubo saturación prolongada; las demoras en cola y por congestión interna, en cualquier caso; el tiempo medio detenido por movimiento de pasajeros; la longitud media de la cola y longitud al final del período; el porcentaje del tiempo que se excede una longitud predeterminada por el usuario, para evaluar probabilidad de bloqueo hacia atrás; las tasas medias de subida y bajada por detención y el número de detenciones según tipo.

El programa muestra en pantalla una visión animada de la simulación y algunos de los resultados y produce un archivo de salida más completo. Se puede ejecutar sin animación en pantalla, lo que acelera enormemente su ejecución. Corre en un computador PC compatible, con monitor en colores o monocromático.

Una descripción detallada se encuentra en Gibson, Baeza y Beckett (1989).

#### 4.3 Algunos resultados

Haciendo uso del programa se ha explorado la influencia de diversos factores sobre la capacidad de un paradero. El de mayor importancia es la demanda de pasajeros debido a su efecto sobre  $t_p$  e indirectamente sobre  $t_E$ . Como ésta varía considerablemente en el tiempo, también lo hace la capacidad. Entre situaciones típicas de hora punta y no-punta, la diferencia es de simple a doble, o más que eso.

Para el tipo de paradero considerado ( aislado, entrada FIFO y configuración lineal ) el aporte de agregar un sitio es fuertemente decreciente con su número, a menos que impere el comportamiento de detenerse una sola vez y en el sitio más próximo a la salida. Es poco realista esta condición, pues los pasajeros tienden a distribuirse más desordenadamente en el andén cuando mayor es su extensión.

Las detenciones múltiples por movimiento de pasajeros tienen un efecto negativo apreciable sobre la capacidad. En cambio, es un aporte positivo que se permita la disciplina de salida AP y que los conductores no interesados en detenerse no pasen por el área de parada.

Para diversas combinaciones de demanda y modalidad de operación han sido obtenidas capacidades en un rango que va entre 140 y 390 buses/hr. Si el paradero no está aislado, estos valores pueden reducirse significativamente. Es explicable entonces que en zonas y períodos de alta demanda de pasajeros se produzcan graves saturaciones. Al ocurrir éstas, es lógico que los conductores intenten aumentar la capacidad, usando una segunda y tercera pista para detenerse frente al paradero. Más aún, si es poco eficiente extender el paradero "añadiendo" sitios hacia atrás. Entonces, los comportamientos aparentemente caóticos que se detectan en muchos lugares es, probablemente, una respuesta al déficit de capacidad de los paraderos.

#### 5. CONSIDERACIONES FINALES

Los resultados anteriores permiten afirmar que donde hay altos flujos de buses la capacidad de los paraderos constituye una restricción activa en lugares de alta demanda. Cuantitativamente, a partir de flujos de 120 - 150 buses/hr la probabilidad de que haya períodos con saturación es relativamente alta. Esto conduce a demoras considerables y a incentivar el uso indiscriminado de la calzada como área de parada, afectando el resto del tráfico.

Es indispensable reconocer entonces que se debe diseñar los paraderos para dotarlos de una capacidad apropiada. Puesto que grandes áreas de parada ( cuadras-paradero ) no son una buena solución, la creación de paradas escalonadas de pocos sitios cada uno, para grupos de recorrido con afinidad de

destino, parece ser el camino más provechoso. Esto ayuda también a concentrar los pasajeros, evitando detenciones múltiples de los buses.

Esta clase de esquemas, junto a las ventajas del uso de la pista adyacente al área de parada por los buses que no ingresan al paradero o que salen de él adelantando, reclaman libertad de movimientos para estos vehículos. Confinarlos en una pista Sólo Bus es contraproducente. Lo que es exitoso en ciudades con muchos buses y pocos autos no tiene porque serlo en un contexto diferente.

Sin embargo, en ciudades como las nuestras hay condiciones muy diversas en calles céntricas o de áreas periféricas. Es de esperar que haga falta recurrir a distintos tipos de paradero según el caso. Con esta perspectiva, el modelo presentado intenta cubrir una variedad de combinaciones. Estas pueden ser ampliadas, especialmente en lo que se refiere a incorporar el efecto de intersecciones contiguas y configuraciones no lineales. Con este propósito se han emprendido nuevas investigaciones.

Estas extensiones pueden significar la generación de fórmulas para la capacidad diferentes a la ec. ( 8 ). No obstante, la definición de ésta, y la distinción de tres tipos de demoras permanecen. Estas son las contribuciones teóricas relevantes de este trabajo.

#### AGRADECIMIENTOS

El desarrollo de esta investigación fue financiado principalmente con un subsidio del Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico ( Proyecto 286-87). El programa fue implementado por Russell Beckett. Los autores agradecen la colaboración del Dr. Luis Willumsen y de Pedro Szász en la conceptualización de un paradero.

#### REFERENCIAS

BAEZA, I.(1989) Estimación de la capacidad de paraderos de buses. Memoria de Ingeniero Civil, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

CADE-IDEPE( 1988 ) Metodología de análisis y seguimiento del transporte público. Informe final a la Intendencia de la Región Metropolitana, Santiago.

GIBSON, J. (1984) Comportamiento en un paradero con alto flujo de buses. Actas del Primer Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte, Universidad de Chile, 7-9 de Mayo 1984, Santiago, 157-171.

GIBSON, J. y MUÑOZ, J. ( 1983 ) Estudio del comportamiento de la locomoción colectiva en un paradero del centro de Santiago ( nota no publicada ).

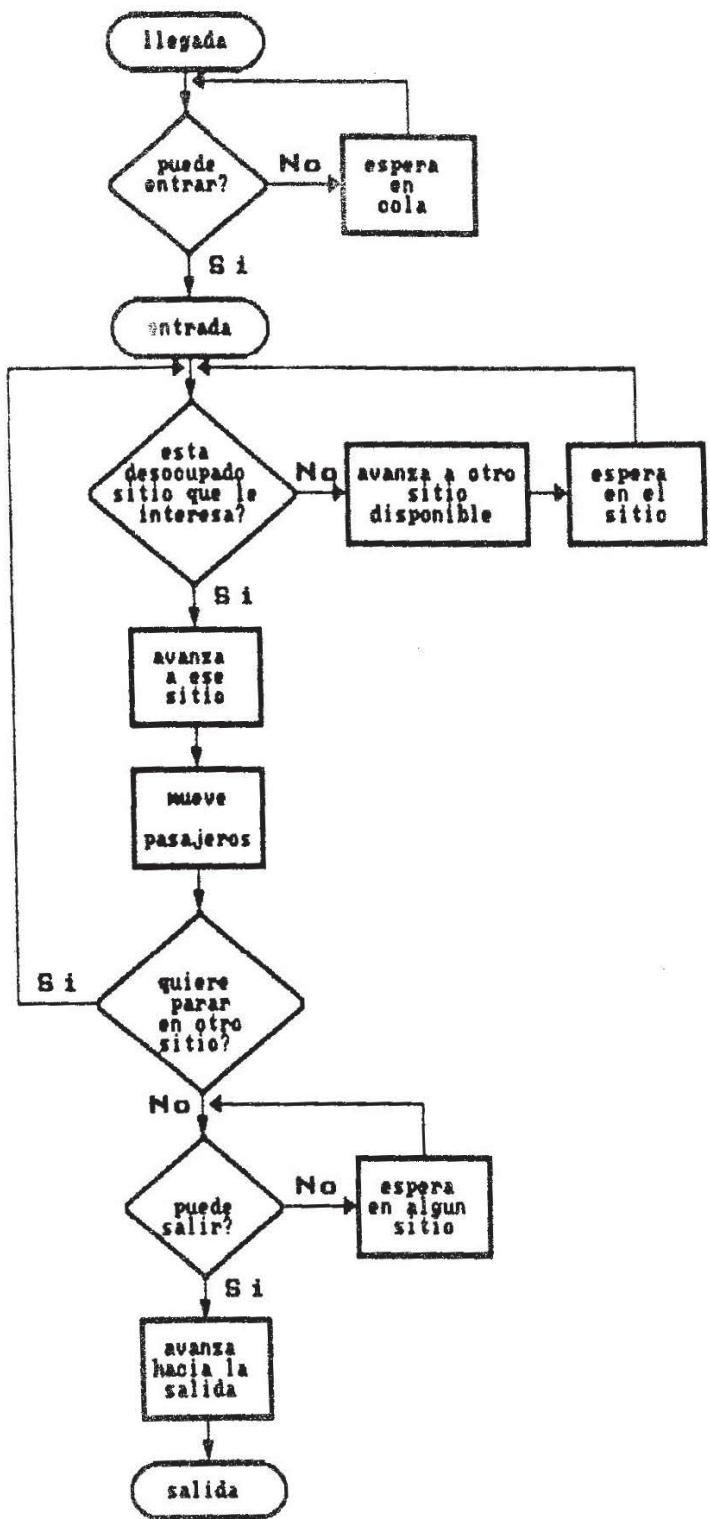
GIBSON, J., BAEZA, I. y BECKETT, R. ( 1989 ) IRENE: Un programa de simulación de paraderos. Presentado al IV Congreso Latinoamericano de Transporte Público y Urbano, 18-22 Septiembre 1989, La Habana.

GUENTHNER, R.P. Y HAMAT, K. ( 1988 ) Transit dwell time under complex fare structure. Journal of Transportation Engineering, Vol. 114, Nº 3, 367-379.

KIMBER, R.M. Y DALY, P. ( 1986 ) Time-dependent queueing at road junctions: observation and prediction. Transpn Res.B, 20B(3), 187-203.

LINDAU, L ( 1984 ) Um modelo microscópico de tráfego urbano. Actas del III Congreso Panamericano de Ingeniería de Tránsito y Transporte, ANTP, Septiembre 1984, São Paulo.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD ( 1985 ) Highway Capacity Manual. Special Report Nº 209, National Research Council, Washington, DC.



**FIGURA 2.2 : ESTRUCTURA DEL PROCESO DE OCUPACION**