
MODELACION DE INTERSECCIONES SEMAFORIZADAS PARA SIMULAR SU INTERACCION CON UN PARADERO DE BUSES

Jaime Gibson

Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile
Casilla 228-3, Santiago. Tel.: 6710328. Fax: 6712799

Guilermo Guerrero

Departamento de Ingeniería de Transporte
Pontificia Universidad Católica de Chile

RESUMEN

La simulación de un paradero aislado, mediante el programa IRENE, ha representado una contribución a la comprensión de los procesos que ocurren en su interior y al desarrollo de técnicas de diseño de paraderos. Sin embargo, es infrecuente encontrar esa condición de aislado y se hace necesario incorporar los fenómenos de interacción del paradero con su entorno.

Se presenta un análisis de esos fenómenos, concluyendo que los principales son los relacionados con la existencia de intersecciones semafORIZADAS cercanas, aguas arriba y/o abajo del paradero, y un método para modelarlos. Este tiene por propósito combinar el realismo con una minimización de las modificaciones al complejo módulo de simulación de IRENE. Para ello, se generan algoritmos que permiten vincularlo con la intersección aguas arriba sólo a través del patrón temporal de llegada de los buses; para la aguas abajo, el nexo se establece a través de determinar el instante en que un bus está libre para abandonar el paradero una vez que la simulación identifica que está listo para hacerlo. Se explica sintéticamente la estructura de ambos algoritmos.

Ya se ha logrado incorporar al programa la intersección aguas arriba. Se hace un comentario sobre los resultados obtenidos para algunos casos. Destaca que no se encuentran cambios significativos en colas y demoras con respecto a lo que sucede en un paradero aislado. Se discute este resultado y su validez y las prioridades para futuras investigaciones sobre estos fenómenos de interacción.



1. INTRODUCCION

Investigaciones previas han puesto de relieve que donde hay flujos significativos de buses, los paraderos se constituyen en fuentes principales de demoras, durante los períodos de alta demanda de subida de pasajeros. Esto ha sido confirmado por experiencias recientes en que un rediseño del sistema de paraderos ha reportado sustanciales disminuciones del tiempo de viaje de los buses, como es el caso del esquema implementado en un tramo de la Alameda B. O'Higgins en Santiago (Araya et al., 1993). El creciente interés por esquemas de este tipo llama a destinar esfuerzos al desarrollo de métodos que sustenten su diseño.

La herramienta más usada en esos métodos en el país es el programa de simulación IRENE (Gibson et al., 1989) sea directamente o a través del empleo de resultados genéricos obtenidos con el programa. Ha sido catalogado como el programa con mejores características de los disponibles en esta área (Arany et al., 1992) aunque tiene algunas limitaciones por los supuestos en que se basa. La principal es que trata el paradero como un ente aislado del resto de la vialidad.

Este trabajo presenta extensiones al modelo que subyace a IRENE, encaminadas a incorporar la existencia de intersecciones semaforizadas aguas arriba y aguas abajo del paradero. Esta es la condición de interacción del paradero con su entorno que se estima de mayor importancia. El punto había sido abordado primariamente en el desarrollo de las versiones 2.0 y 2.51 β del programa (Beckett, 1990). Sin embargo, ese tratamiento es insuficiente para representar adecuadamente diversas situaciones que son relevantes a la luz de los primeros experimentos sobre infraestructura especializada para buses realizados en Santiago. Ha sido necesario concebir un nuevo enfoque del problema que conserva un rasgo fundamental: procurar que los procesos que se introducen se vinculen de la manera más sencilla posible con el módulo de simulación de un paradero aislado. La complejidad de éste, de carácter microscópico y estocástico y sensible a variaciones de la demanda en el tiempo, así lo justifica.

En el capítulo 2 se hace un análisis general de los fenómenos de interacción paradero-entorno y se sitúa el caso de intersecciones semaforizadas cercanas en relación con los supuestos básicos del funcionamiento de un paradero aislado. El capítulo 3 contiene la descripción de los modelos elaborados para incorporar la influencia de semejantes intersecciones aguas arriba y abajo a IRENE.

El capítulo 4 presenta una breve discusión de resultados obtenidos con una nueva versión del programa, que ya incluye una intersección semaforizada aguas arriba, y de las líneas prioritarias de investigación a futuro.



2. INTERACCION PARADERO-ENTORNO

2.1. GENERALIDADES

Para IRENE, un paradero está conformado por un andén para los pasajeros que suben o bajan y un área de parada para los buses. Esta última ocupa la pista ubicada junto al andén y puede tener uno o más sitios pero configurados linealmente, o sea, uno tras otro en la misma pista.

Este supuesto, así como el de que los sitios pueden ser usados por cualquiera de los buses que se detienen en el paradero, bajo una modalidad especificada por el usuario, y el de que los buses son (razonablemente) homogéneos e ingresan al área de parada con una disciplina FIFO, se mantendrán inalterados en este trabajo. Igualmente, se continuará representando el desplazamiento de los buses mediante trayectorias espacio-tiempo rectificadas (abstrayéndose de procesos de frenado y aceleración, cuyos tiempos perdidos asociados se incluyen en la demora) y asumiendo que por el área de parada sólo pasan buses.

En el marco de estas definiciones, la condición de paradero aislado implica que:

- a) sólo interesan las llegadas al área de parada de los buses que pasan por ella (no necesariamente todos los buses que circulan por la vía) y que ellas no están reguladas por ningún elemento aguas arriba del paradero;
- b) la salida de un bus del área de parada sólo depende de que haya terminado sus operaciones en el paradero y no esté obstruido por otro bus que aun no abandona el área. Es decir, se ignora cualquier elemento situado aguas abajo del paradero.

Para el patrón de llegada se ofrecen dos posibilidades:

- intervalos que siguen una distribución M3 de Cowan (1975), que corresponde a un proceso aleatorio;
- intervalo constante, asociado al caso (improbable) de buses o vehículos similares (tranvías) que operan con una regulación de frecuencia en linea.

Establecida por el usuario la opción elegida, el programa genera los instantes de llegada al área de parada, dentro del período simulado, para todos los buses correspondientes. Luego inicia la simulación bus a bus. Si cuando un cierto bus llega al área la entrada no está despejada, lo mantiene en la cola de entrada hasta que se despeje. Esta cola se trata como si fuera vertical, en la línea de entrada.

En cuanto a la salida, hay también dos posibilidades:

- disciplina FIFO, en que todos los buses deben salir pasando por el primer sitio del área de parada, generándose esperas dentro del área si algún bus es obstruido por otro que lo precede;
- permitir la salida por la pista adyacente desde los sitios posteriores al primero, lo que evita las mencionadas esperas.

Para la primera de estas opciones, el programa considera que el bus puede abandonar el área de parada en el instante en que, estando en el primer sitio, está listo para salir por haber terminado sus operaciones en el paradero. En la segunda opción, se levanta la restricción de tener que encontrarse en el primer sitio y se supone que si un bus está listo en el segundo sitio o posterior y su avance por la pista del área de parada sería impedido por otro bus, saldrá de inmediato por la pista adyacente.

Es decir, la diferencia estriba en dónde se puede considerar que un bus está listo para salir del área de parada pero, en cualquiera opción, una vez que lo está se le supone libre para hacerlo.

Hay que resaltar la siguiente distinción. Los instantes de llegada de los buses al paradero están todos referidos al mismo punto (línea de entrada al área de parada) y se determinan antes de iniciar la simulación propiamente tal. En cambio, los instantes de salida pueden estar asociados a distintos puntos (sitios) y se determinan bus a bus como producto de la simulación, terminando ésta para cada bus en ese instante.

Dentro del contexto expuesto, es evidente que el entorno sólo puede influir condicionando el proceso de llegadas de modo distinto a los procesos contemplados o bien invalidando el supuesto de que un bus es libre para salir una vez que está listo dentro del área de parada. Entonces es factible incorporar la relación con el entorno sin alterar el módulo de simulación en sentido estricto. Basta con agregar procesos de llegada alternativos, que son previos al inicio de la simulación, y un módulo que determine cuándo podrá efectivamente salir un bus después que la simulación establece que está listo. La distinción mencionada en el párrafo anterior deja en claro que cada tema debe tratarse separadamente.

2.2. LLEGADA AL PARADERO

La situación real en que cabe esperar que surja un patrón de llegada sustancialmente diferente a los hasta ahora considerados es que exista una intersección semaforzada cercana aguas arriba del paradero, que generará pelotones de vehículos cíclicamente. A primera vista hacer pasar los buses por esa intersección antes de llegar al paradero es algo sencillo puesto que se realiza fuera del módulo de simulación. Un análisis más profundo indica que hay complicaciones nada despreciables.

Desde el punto de vista del paradero interesan solamente los buses que pasan por él. Pero en la intersección aguas arriba ellos pueden estar mezclados con otros vehículos (autos, buses que no pasan por ese paradero, etc.) y distribuidos en diversas pistas. Incluso, los buses relevantes pueden provenir de distintas vías que concurren a la intersección. Se llegaría así a la necesidad de simular



detalladamente la intersección, cosa computacionalmente compleja y que requiere muchos datos, para saber qué pasa con una fracción pequeña del total de vehículos que la atraviesan. Sin embargo, debe tenerse presente que si ocurre esta dispersión del origen de los buses que van al paradero, la influencia del semáforo se diluye y probablemente las llegadas al paradero serán bien representadas por la distribución M3.

El caso verdaderamente conflictivo con el supuesto de paradero aislado es cuando los buses del paradero provienen, todos o en su gran mayoría, de la misma pista en la intersección. A él nos limitaremos en este trabajo. Pero un mínimo de realismo exige aceptar que esa pista puede también ser usada por autos, que viran en la intersección o siguen directo y cambian luego de pista para evitar pasar por el área de parada. Es razonable suponer que los buses que estarán en esa pista son los que van al paradero; los demás se situarán en otras pistas, comportamiento que se corresponde con lo observado.

Una situación especial se presenta cuando hay dos paraderos cercanos. Ella se suele producir con esquemas de paraderos divididos o en vías exclusivas para buses. Como IRENE simula paraderos individuales hay que determinar separadamente las llegadas a cada uno pero puede haber interrelación. Caben varias posibilidades:

- a) Buses pueden usar dos o más pistas en la intersección. Se supondrá que los buses que van al paradero más próximo usan la pista derecha y los que van al siguiente se agrupan en la segunda pista. Al simular cada paradero se estará considerando una sola pista en la intersección aguas arriba pero en cada caso será una pista distinta, lo que importa para especificar los flujos de autos pertinentes.
- b) Pista exclusiva sin adelantamiento. Todos los buses usan la misma pista en la intersección y deberán pasar por el área de parada de cada paradero aunque no se detengan para transferir pasajeros en alguna de ellas. Esto plantea una dificultad al simular el segundo paradero pues todos los buses han tenido que atravesar el primero para llegar a él. Si hay actividad significativa en el primer paradero, la influencia de la intersección semaforizada en el patrón de llegada al segundo será despreciable y éste puede ser simulado como aislado con llegadas aleatorias. En caso contrario, para preservar dicha influencia, al simular el segundo paradero se introduce el paso por el primero agregando la demora media en él a cada bus en su tiempo de recorrido desde la intersección.
- c) Pista exclusiva con adelantamiento en los paraderos. Este caso, típico de corredores segregados, es más complicado y no se trata en este trabajo.

Por otro lado, la cercanía entre paraderos da pie a otro fenómeno de interacción: interferencia de buses que salen de uno con los que desean entrar al siguiente. Esto es indeseable por lo que el diseño debe evitar su existencia o, cuando menos, limitar severamente su probabilidad de ocurrencia. La única forma de considerarlo en IRENE, por ahora, es a través de la velocidad de los buses.



En suma, es posible incorporar con cierta generalidad la existencia de una intersección semaforzada aguas arriba del paradero modelando sólo una pista en ella. Dado el análisis anterior, únicamente tiene sentido considerar la operación del semáforo con tiempos prefijados, manteniendo el plan durante el período de simulación. El modo de generar el patrón de llegadas al paradero se describe en la sección 3.1. Finalmente, la teoría indica que cambios en este patrón no deben tener impacto perceptible en la capacidad del paradero pero sí en las demoras que se producen en él.

2.3. SALIDA DEL PARADERO

Aquí la cuestión es qué condiciones del entorno pueden incidir en que la salida desde el área de parada se vea obstruida. La más evidente es que haya una cola de vehículos originada por una intersección cercana aguas abajo. Nuevamente, el caso de mayor interés práctico es cuando la intersección es semaforzada; si es regulada por señal de prioridad, seguramente será prioritaria la vía que tiene un flujo importante de buses y en ese evento no aparece cola. La proximidad de un paradero a la entrada a una rotonda es compleja de analizar pero es algo indeseable en términos de capacidad por lo que es más bien función del diseño impedir que exista.

Estudiemos primero la salida con disciplina FIFO desde un paradero hacia una intersección semaforzada. Si hay cercanía entre ambos elementos, el supuesto de que por el área de parada sólo pasan buses conduce lógicamente a asumir que estos se mantienen en ella y son los únicos usuarios de la pista correspondiente en la intersección. Entonces, cuando un bus está listo para salir hay que preguntarse si podrá hacerlo. La respuesta es afirmativa siempre que la cola en la pista en ese instante no ocupe todo el tramo entre la línea de detención de la intersección y la línea de salida del área de parada. De ser negativa, hay que determinar cuándo la cola liberará el espacio delante de la línea de salida. En la medida que esta cola sólo puede estar compuesta por los buses que han salido previamente del paradero y que el proceso de descarga de ella en la intersección es conocido, se puede generar un procedimiento analítico iterativo para responder la pregunta, que es activado cada vez que el módulo de simulación establece que hay un bus listo para salir en el primer sitio.

Es cierto que si la distancia entre paradero e intersección no es muy pequeña pueden ingresar otros vehículos a la pista o bien cambiar de pista los buses que salen del paradero. Tener en cuenta estos fenómenos obligaría a incorporarlos a la simulación microscópica, lo que es una complicación enorme. Considerando que el comportamiento supuesto replica aceptablemente la realidad donde hay flujos altos de buses y especialización de infraestructura, en esta etapa parece suficiente reducirse a esa hipótesis.

Cuando hay más de un paradero antes de la intersección, es el más cercano a ella el que estará eventualmente afectado por la interacción. Se seguirá suponiendo que la salida del paradero anterior no depende de condiciones aguas abajo. También se continúa excluyendo el tratamiento de un corredor segregado.

Ahora, si se admite la salida por la pista adyacente al área de parada, ella también puede ser obstruida por la cola de la intersección en esa pista. Pero ya no cabe suponer que esta cola sólo está compuesta por los buses que salen del paradero. Puede haber buses que no pasan por el paradero y otros vehículos. Para evitar la referida complicación se hace la siguiente simplificación. En principio, la cola en la pista adyacente debe tener, en cada instante, una longitud al menos igual a la de la pista del paradero. Entonces, cuando ésta se bloquea también debería bloquearse la salida por



pista adyacente y asimismo, el desbloqueo debe producirse contemporáneamente. Esta técnica hace posible controlar todo el proceso de salida del paradero a partir de la situación de una pista en la intersección.

La salida por pista adyacente no está sólo en función de que no haya cola generada aguas abajo. Como implica un cambio de pista, en rigor sólo es posible si hay una brecha apropiada en el flujo de la pista adyacente, lo que reintroduce condiciones aguas arriba del paradero. La búsqueda de una solución practicable, que no obligue a ampliar el ámbito de la simulación microscópica, demanda nuevamente una simplificación en este punto.

Para la modalidad de operación más eficiente (bus se detiene en sitio disponible más próximo a la salida) se hace escaso uso de la salida por pista adyacente aunque esté permitida. Esto le quita importancia a la modelación detallada de esta variante. Por otra parte, existe la posibilidad de prohibirla o de autorizarla irrestrictamente (salvo por cola aguas abajo), lo que permite acotar el problema simulando ambas condiciones. El argumento anterior conduce a esperar que no haya mucha diferencia entre estos extremos y si se pronostica que la situación real estará en cierto punto intermedio, se puede hacer una estimación confiable por interpolación.

En contraste con el caso de la intersección aguas arriba, la capacidad del paradero puede experimentar una reducción significativa por efecto de la cola originada por la intersección semaforizada aguas abajo. Ella repercutirá en las demoras. La necesidad de explorar pronto la naturaleza de estos impactos justifica el enfoque simplificado propuesto. El procedimiento para determinar el instante en que un bus queda libre para salir se describe en la sección 3.2.

3. ALGORITMOS

En este capítulo se describe sintéticamente los algoritmos desarrollados para vincular el funcionamiento de un paradero con el de intersecciones semaforizadas aguas arriba y abajo de él. Una explicación más detallada puede encontrarse en Guerrero (1995). Si bien, como se ha dicho, estos algoritmos son exógenos al módulo de simulación del paradero de IRENE, su concepción ha estado marcada por el propósito de que se integren con él de forma sencilla y consistente. Otro objetivo de diseño es combinar el realismo en la representación de los fenómenos que interesan con la economía en el requerimiento de datos adicionales al usuario y la preservación de la flexibilidad de modelación que caracteriza a IRENE (vía parametrización).

En ambas intersecciones se supone que cada uno de los semáforos mantiene un plan durante todo el período de simulación. Además, que la pista considerada en cada caso sólo recibe un periodo de verde dentro del ciclo. El plan correspondiente está caracterizado por un tiempo de ciclo c y un verde efectivo v_e , los que pueden variar entre intersecciones.



3.1. GENERACION DEL PATRON DE LLEGADA

La alimentación de IRENE desde aguas arriba se resume en un vector de instantes de llegada de los buses a la línea de entrada del área de parada. Se agrega la opción de que los buses deban pasar previamente por una intersección semaforzada, de la cual se considera sólo la línea de detención de una pista. En este caso, las llegadas a intervalo constante o distribuidos según una M3 se producirán a esa línea de detención y hay que modelar el proceso desde allí a la linea de entrada.

En cada corrida, IRENE simula una cantidad dada de buses, igual al producto de dos datos: flujo de buses que pasa por el área de parada (q_B) y duración del período de simulación (T). No obstante, en la intersección aguas arriba ellos pueden estar compartiendo la pista con autos que viran y que siguen directo, cuyo flujo (q_V , q_D) debe darse como dato. En la línea de detención habrá que considerar la llegada de $T(q_B + q_V + q_D)$ vehículos y un número de ciclos T/c. La pista en referencia depende de la situación en análisis, según se indica en la sección 2.2. El algoritmo distingue tres procesos: llegada de los vehículos a la línea de detención, salida desde ésta y llegada de los buses al área de parada.

a) Llegadas a la línea de detención. Sean aleatorias o a intervalo constante, hay que determinar los instantes de llegada identificando de qué tipo de vehículo se trata en cada caso. Para ello, se genera primero aleatoriamente una secuencia de vehículos que respeta la cantidad total de cada tipo. Hay numerosas secuencias de llegadas compatibles con los totales especificados por el usuario, lo que se recoge en IRENE haciendo corridas múltiples para un mismo conjunto de datos. Dada una secuencia, se obtienen los intervalos entre llegadas, según sea la forma elegida para ellas. Si son aleatorias, es necesario crear un procedimiento especial para respetar el intervalo mínimo propio de los buses, que mostró buenos resultados en un experimento de validación (Gibson y Guerrero, 1995).

b) Salidas de la línea de detención. Conocido el patrón de llegada, la operación del semáforo para la pista y parámetros de capacidad (flujo de saturación básico s_b y factores de equivalencia f_i) se puede obtener las salidas con un sencillo método analítico. El instante de salida del vehículo k (orden dado por la secuencia de llegadas) está dado por:

$$IS(k) = m \times \{IP(k); IL(k)\} \quad (1)$$

donde $IL(k)$ es el instante de llegada de ese vehículo, determinado en la etapa precedente, e $IP(k)$ es el instante de salida mínimo posible. El vector IP resulta de una asignación de las salidas a cada período de verde y al interior de éste se cumple que:

$$IP(k+1) = IP(k) + \beta_i(k+1) \quad (2)$$



donde:

$$\beta_i(k+I) = \frac{3600}{s_b} f_i(k+I) \quad (3)$$

Además de obtener el patrón de salida de la línea de detención puede calcularse la demora de cada vehículo en ella mediante:

$$d(k) = IS(k) - IL(k). \quad (4)$$

Un caso especial se presenta si hay sobresaturación en la pista, de modo que al finalizar el período que será simulado no han salido todos los vehículos. Si es un fenómeno transitorio que se produjo en el o los últimos ciclos, se extiende el período hasta hacer salir todos los vehículos; el cumplimiento de esta condición se asocia a que el grado de saturación en la línea de detención sea menor que 1. En caso contrario, no se extiende el período y se limita el flujo que pasa a la capacidad. Si esto no corresponde a la realidad, el usuario puede modificar los datos (flujos o flujo de saturación básico, probablemente).

c) **Llegada al paradero.** Determinado el patrón de salida de la línea de detención, se extrae de él sólo los buses. Su instante de llegada a la línea de entrada del área de parada será su instante de salida más un tiempo de viaje entre ambos puntos. Se supone que este tiempo es una constante, ya que se trata de una distancia corta y vehículos homogéneos. Su valor es el cuociente entre esa distancia (nuevo dato) y la velocidad de un bus (dato ya existente en IRENE). Resulta así un arreglo que contiene los instantes de llegada de todos los buses que pasarán por el paradero, insumo que requiere IRENE para iniciar la simulación. Estos instantes están referidos a un tiempo 0 convencional, que coincide con el comienzo de un período de rojo efectivo para la pista correspondiente en la intersección semaforizada aguas arriba.

3.2. CONTROL DE SALIDAS DEL PARADERO

De acuerdo con el análisis de la sección 2.3 el efecto de la existencia de una intersección semaforizada aguas abajo consiste en que se hace posible que estando listo un bus para abandonar el área de parada, no pueda hacerlo por existencia de colas generadas por la intersección. El enfoque planteado permite controlar todo el proceso de salida, aunque se haya especificado que los buses pueden salir adelantando por la pista adyacente a la del área de parada, a partir del análisis de la situación en esta última. Por ella, dentro de nuestros supuestos, sólo circulan buses que pasan por dicha área.

Cuando el módulo de simulación de IRENE determina que hay un bus listo para salir en el primer sitio la pregunta de si está en libertad para hacerlo debe responderse en función de la situación de la cola eventualmente originada por la intersección en ese instante. Esto invita a llevar un registro permanente de esa cola pero es un camino poco atractivo. El semáforo opera continuamente e



IRENE está asociado a eventos, cuya ocurrencia identifica instantes. Por ello, la incorporación de la intersección misma al proceso de simulación plantea serias dificultades.

Se ha creado un algoritmo que permite responder la pregunta referida cada vez que es formulada, basado también en la ocurrencia de eventos en la línea de detención y en aprovechar el hecho que los buses que activan la pregunta son los únicos usuarios de esa línea e integrantes de la cola.

Un bus estará libre para salir si puede avanzar hacia la intersección, condición que se satisface si:

- se está en período de verde efectivo y la linea de salida del paradero coincide con la de detención (nula distancia paradero-intersección), o bien
- hay espacio disponible para almacenar al menos un bus entre ambas líneas.

Examinemos más en detalle esta última situación. Sea A el máximo número de buses que se puede almacenar entre ambas líneas. Se trata entonces de que en el instante en que se pregunta, el bus anterior esté posicionado en el lugar ($A - 1$) o más adelante. Se supondrá que un bus avanza siempre que puede, aunque sólo gane un lugar en la cola. Con este supuesto y el de trayectorias espacio-tiempo rectificadas se construye un sencillo modelo.

Imaginemos que los buses pudieran desplazarse hasta la línea de detención y formar ahí una cola "vertical". El instante más temprano en que un bus i puede llegar a esa línea será el de salida del bus $(i-A)$ más A intervalos mínimos de salida de un bus. Este instante está desplazado con respecto al en que deja la linea de salida del área de parada en el tiempo de viaje entre ambas líneas. Considerando que IRENE pregunta cuándo puede iniciarse, no completarse, la salida del bus, debe restarse un intervalo mínimo de salida del tiempo anterior para colocarse exactamente en la condición requerida.

Sean:

- | | |
|-----------|---|
| $T_p(i)$ | = instante en que el bus i está listo para salir en el primer sitio |
| $T_s(i)$ | = instante en que sale el bus i de la línea de detención en la intersección |
| β_b | = intervalo mínimo de salida de un bus (ver ec. 3) |
| t_v | = tiempo de viaje entre líneas de salida del paradero y de detención. |

Entonces, el bus estará libre para salir en $T_p(i)$ si se cumple que:

$$T_p(i) \geq T_s(i - A) + (A - 1) \beta_b - t_v. \quad (5)$$

Se puede demostrar que esta misma condición engloba el caso en que el paradero llega hasta la línea de detención si se calcula $T_s(i)$ con el procedimiento que sigue. Designemos por IVE(0) el inicio del



primer período de verde efectivo para la pista. Para asegurar consistencia con el semáforo aguas arriba si están coordinados con un desfase relativo D entre inicios del rojo efectivo:

$$\text{IVE}(0) = D + c - v_e. \quad (6)$$

Se definen las variables auxiliares $x(i)$ y $y(i)$, dadas por:

$$x(i) = TB(i) + \beta_b - \text{IVE}(0) \quad (7)$$

donde $TB(i) = T_p(i)$, si $A = 0$
 $= \max \{T_p(i) + t_v; T_s(i-1)\}$, si $A > 0$

$$y(i) = x(i) - c \lceil \frac{x(i)}{c} \rceil \quad (8)$$

Entonces, puede demostrarse que:

$$\begin{aligned} T_s(i) &= TB(i) + \beta_b, && \text{si } y(i) \leq v_e \\ &= TB(i) + 2\beta_b + c - y(i), && \text{si } y(i) > v_e. \end{aligned} \quad (9)$$

Para aplicar este algoritmo se requiere conocer para cada bus i , los tiempos de salida $T_s(i-k)$ con $k \in [1;A]$, si $A > 0$. El carácter iterativo del proceso de simulación provee esta información, sólo se necesita generar exógenamente una inicialización. Esta se hace suponiendo que los T_p previos al primer bus se producen a intervalo constante o con los buses que se encuentran en la cola de entrada al paradero al iniciar la simulación, si es que el usuario le especificó un valor no nulo. Dados esos T_p y el funcionamiento del semáforo, encontrar los T_s respectivos es un problema análogo al tratado en el caso de la intersección aguas arriba.

Si no se cumple la condición de la ec.(5), el bus deberá esperar en el primer sitio y quedará libre en el instante $T_s(i-A) + (A-1)\beta_b - t_v$. En tal evento, deberá bloquearse la salida desde otros sitios (si el usuario eligió la opción de permitirla) entre el instante $T_p(i)$ y el en que el bus queda libre. Para reconocer que la cola en la pista adyacente puede ser mayor se incrementa este último en $\delta\beta_b$, donde



$\delta \geq 1$ es un parámetro que especifica el usuario. Definido el instante en que el bus puede salir se calcula la espera interna que experimentó. La Figura 1 muestra un esquema general del algoritmo.

Se genera así la respuesta que requiere el módulo de simulación del paradero. Puede además calcularse la demora en la intersección de cada bus que sale por la pista del área de parada ($d_s(i)$) con:

$$d_s(i) = T_s(i) - (T_p(i) + \beta_b + t_v) - \max \{ 0; T_s(i-A) + (A-1)\beta_b - T_p(i) - t_v \} . \quad (10)$$

Los datos adicionales son pocos y sencillos:

- semáforo: D, c, v_c
- línea de detención: s_b, f_B, δ
- distancia línea de salida - línea de detención, L_{PI} , con la que se calculan $A = [L_{PI}/L_s]$, donde L_s es la longitud de un sitio, y $t_v = [AL_s/v_B + 0,5]$, donde v_B es la velocidad de un bus.

4. COMENTARIO FINAL

La introducción de fenómenos de interacción de un paradero con su entorno es esencial para potenciar la utilidad del programa IRENE, como instrumento de apoyo tanto en la construcción de una teoría sólida sobre la operación de paraderos como en el diseño de estos. Siendo la existencia de intersecciones semafORIZADAS cercanas la principal fuente de interacción, su incorporación es tarea prioritaria. Los algoritmos presentados en este trabajo permiten llevarla a cabo con un razonable grado de realismo, alteraciones mínimas del módulo de simulación y pocos datos adicionales.

De hecho, ya hay una versión que incluye una intersección semafORIZADA aguas arriba del paradero con la cual se ha comenzado a analizar el impacto de la interacción (Gibson y Guerrero, 1995). Para una gama de casos se comparó el funcionamiento predicho del paradero considerado como aislado con diversas especificaciones de la situación en la intersección. Estas contemplan variaciones en la composición del tráfico en la pista, en la programación del semáforo y en la distancia al paradero.

Los resultados confirman que la capacidad del paradero es independiente del patrón de llegada. Lo inesperado es que la longitud de cola y la demora obtenidas son prácticamente idénticas entre las diversas situaciones mencionadas y, más aún, entre ellas y las de un paradero aislado con llegadas aleatorias. Sólo se encontró diferencias significativas con este último caso para grados de saturación del paradero cercanos a 1, en que la presencia de la intersección semafORIZADA reduce las colas y demoras si bien su valor es de todos modos alto.

Los casos estudiados corresponden a paraderos con tasas de demanda de pasajeros medias a altas, cuya capacidad es limitada: 110 a 205 buses/h. Entonces, los flujos de buses en la pista considerada



de la intersección son menores o iguales a ese valor lo que significa que en promedio llegan no más de 3 buses por ciclo. En tales condiciones, el grado de apelotonamiento inducido por el semáforo es pequeño, lo que explica que resulte similar al que produce una distribución M3 y que la excepción se observe cuando se trata un mayor flujo de buses. Habrá que continuar estudiando este punto para menores tasas de demanda, lo que implica mayor capacidad del paradero y, consecuentemente, mayor flujo de buses factible.

Las consecuencias prácticas del comportamiento de la interacción en análisis son importantes. Si los resultados obtenidos hasta ahora conservaran su validez en experimentos más amplios, se podrá afirmar que:

- es apropiado programar los semáforos sin considerar efectos en paraderos aguas abajo, como ocurre actualmente;
- hay que diseñar los paraderos con una capacidad tal que su grado de saturación no supere un 60 a 65% en los períodos críticos, criterio planteado por Gibson y Fernández (1995) a partir de un paradero aislado con llegadas aleatorias.

No cabe siquiera suponer que suceda algo parecido al incorporar una intersección semaforizada aguas abajo del paradero, al menos si la distancia entre estos elementos es pequeña. Está en desarrollo una nueva versión de IRENE que contiene el algoritmo presentado en la sección 3.2. Una vez que se haya completado esta versión y empleado para obtener una comprensión exhaustiva de la interacción paradero-intersecciones semaforizadas cercanas, procederá un nuevo paso. El análisis del capítulo 2 y los planes de habilitación de varios corredores segregados para buses en los próximos años, sugieren que ese paso consista en recoger los fenómenos específicos de interacción que aparecen en ellos.



AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha contado con financiamiento de FONDECYT (proyecto 1940518).

REFERENCIAS

Arany, M.C.M., Portugal, L.S. y Tyler, N. (1992) Simulação de pontos de ônibus: novos aspectos a serem considerados. **Revista dos Transportes Públicos-ANTP**, Nº57, 119-130.

Araya, L., Cáceres, L. y Wityk, M. (1993) Evaluación de la implementación del sistema de paradas diferidas en Av.Libertador Bernardo O'Higgins. **Actas del VI Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte**, SECTRA, Santiago, 25-28 Octubre 1993.

Beckett, R. (1990) Sistema de apoyo al diseño y modelación de paraderos de buses. **Memoria de Título**, Departamento de Matemáticas y Ciencias de la Computación, Universidad de Chile.

Cowan, R. (1975) Useful headway models. **Transportation Research**, Vol.9, 371-375.

Gibson, J., Baeza, I. y Willumsen, L. (1989) Bus-stops, congestion and congested bus-stops. **Traffic Engineering and Control**, Vol.30 (6), 291-296.

Gibson, J. y Fernández, R. (1995) Recomendaciones para el diseño de paraderos de buses de alta capacidad. **Apuntes de Ingeniería**, Vol. 18, 35-50.

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**. 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.



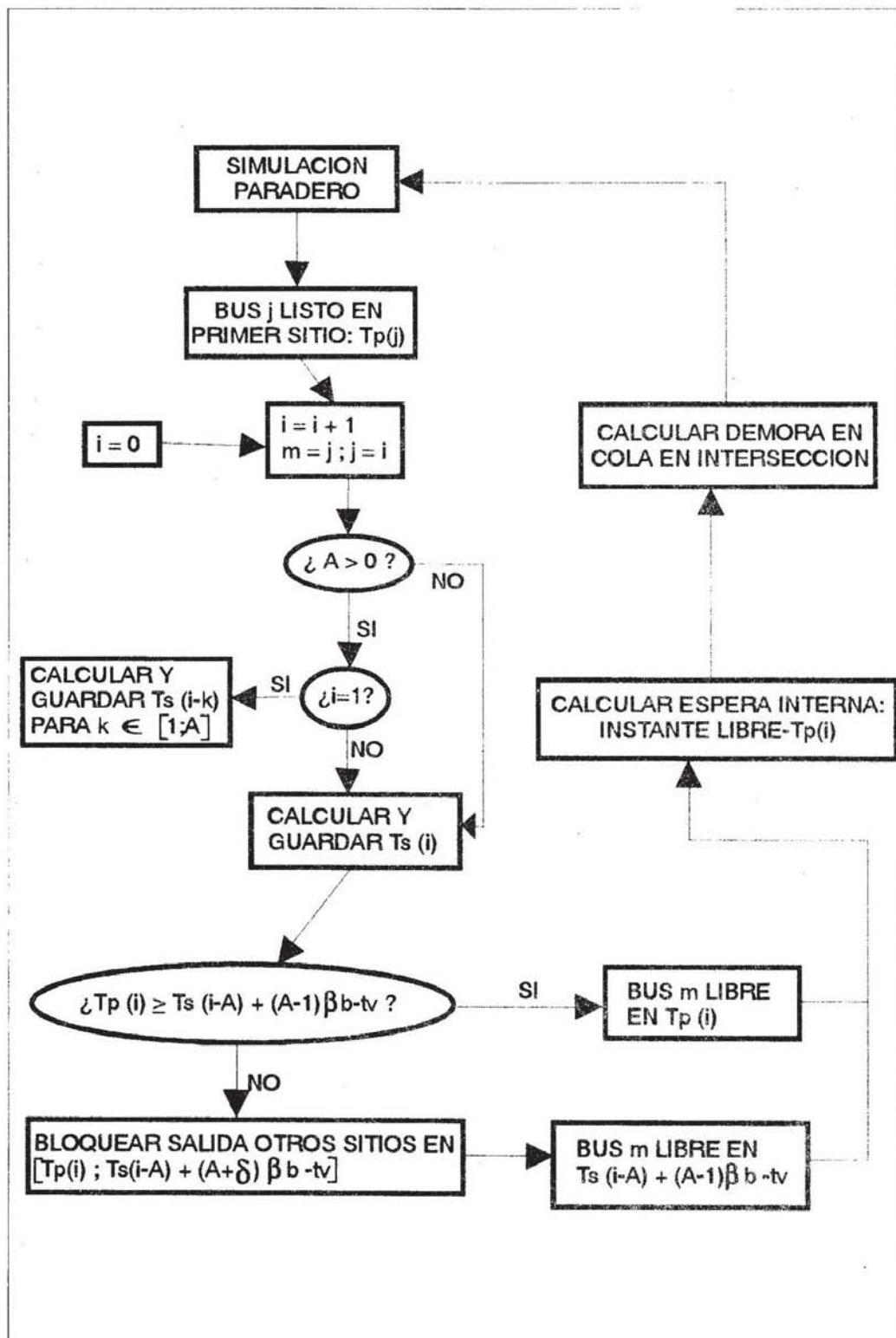


Figura 1: Esquema del algoritmo paradero-intersección semaforizada aguas abajo

