

**BUSTOPS: UN SISTEMA EXPERTO PARA LA LOCALIZACION Y
DISEÑO PRELIMINAR DE PARADEROS DE ALTA CAPACIDAD**

Rodrigo Fernández Aguilera
Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción
Casilla 53-C, Concepción, Chile.

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es contribuir al desarrollo de un sistema experto que asista en la definición y diseño de paraderos de alta capacidad. Para lograr este objetivo, aquellos criterios subyacentes a la localización de zonas de parada de buses son analizados y el proceso de decisión relativo a este problema es definido. A partir de allí, este proceso es desarrollado en la forma de un sistema experto simple.

El sistema experto BUSTOPS es una combinación de algoritmos y opiniones que trata de emular a un experto humano decidiendo, desde una perspectiva global y de manera general, la ubicación y diseño preliminar más conveniente, a lo largo de un eje de transporte público, de paradas de buses con suficiente capacidad como para acomodar altos flujos de locomoción colectiva con sus respectivas demandas de pasajeros.

El sistema probó proveer una adecuada asesoría respecto de este problema, en el contexto para el cual fué diseñado, al ser aplicado a una situación real. Posteriores estudios, así como diseños detallados, deberían realizarse luego de las recomendaciones dadas por el experto, en cada uno de los paraderos establecidos, a fin de definirlos con más precisión.

BUSTOPS constituye un sistema experto prototípico en este campo y se encuentra en proceso de mejoramiento en su base de conocimiento, mecanismos de inferencia y comunicación con el usuario.

1. INTRODUCCION

Los buses constituyen uno de los principales sistemas de transporte público en muchas ciudades del mundo. Para mejorar el nivel de servicio de este sistema en redes urbanas congestionadas pueden implementarse algunas acciones para facilitar el desplazamiento de los vehículos de locomoción colectiva a lo largo de ejes y a través de intersecciones, como parte de esquemas de gestión de tráfico. Es así como el uso de pistas exclusivas para buses (con sus variaciones), prioridad en semáforos, operaciones en convoy, combinaciones de servicios expresos con servicios locales, son algunas respuestas para lograr el objetivo de contar con un sistema de buses urbanos de buena calidad.

Sin embargo, a medida que el flujo de buses aumenta, los problemas de capacidad y demoras llegan a ser más importantes en los paraderos que en arcos o intersecciones. De esta forma, la cuestión de proveer paraderos de buses convenientemente localizados y con suficiente capacidad es un problema que debe ser resuelto apropiadamente.

En este contexto, Gibson et al.(1989) proponen que, para mejorar la operación de los buses, la frecuencia de las detenciones debe controlarse y la capacidad de los paraderos debe mejorarse. Esto puede ser logrado mediante áreas de parada bien definidas (adecuado diseño físico), convenientemente espaciadas, con suficiente capacidad y alejadas de las intersecciones.

La localización de estos Paraderos de Alta Capacidad (PACs) en un eje resulta ser una decisión crítica para el diseño de un sistema de buses urbanos, ya que tres condiciones deberían ser satisfechas simultáneamente. Suficiente espacio vial para los diseños físicos requeridos, conveniente localización desde el punto de vista de la demanda y adecuado comportamiento de los usuarios (pasajeros y conductores). En la mayoría de los casos estos requerimientos son contradictorios.

El proceso de decisión en la localización de PACs en un eje de transporte público no es un problema que pueda ser fácilmente abordado desde una perspectiva netamente optimizante. Esto se debe, por una parte, a la naturaleza discreta de las alternativas factibles, así como a la dificultad de encontrar una función objetivo que resuma convenientemente el fenómeno. Por otra parte, las características de las restricciones involucradas (físicas, operacionales, ambientales, de comportamiento, etc.) hacen que su traducción en términos matemáticos convencionales pueda producir definiciones sesgadas del problema.

Por las razones expuestas, éste parece un proceso de decisión adecuado como para ser tratado desde una perspectiva de sistemas expertos, el cual pueda ser aplicado en diferentes situaciones, pero manteniendo una base de experiencia común respecto del problema. De esta forma, lo que se busca para asistir a la toma de decisiones en este caso es una opinión respecto de

localizaciones alternativas de PACs, más que una localización óptima de uno o varios de ellos. Más aún, como estos criterios son difíciles de adquirir en la práctica, la experiencia ganada en subsecuentes aplicaciones del sistema podría ser transferida a otros lugares con ambientes similares, conservando su flexibilidad.

Este trabajo presenta el desarrollo de un sistema experto prototípico simple que asista en la decisión de localización de paraderos de alta capacidad. En el capítulo 2 hay una revisión de los criterios y consideraciones generales respecto de localización de áreas de parada de buses. El capítulo 3 contiene la definición del proceso de decisión de localización de PACs. La descripción del sistema experto resultante es presentada en el capítulo 4. Una aplicación y sus resultados es mostrada en el capítulo 5. Finalmente, en el capítulo 6 se establecen las principales conclusiones del estudio.

2. CRITERIOS PARA LA LOCALIZACION DE PARADEROS DE BUSES

En la literatura pueden encontrarse varios criterios y recomendaciones generales para la localización de paraderos de buses. Estos se basan en uso del suelo, tipo de vías, distancia de caminata, etc. Por otra parte, existen también algunas proposiciones que consideran algún aspecto específico del problema (tamaño de flota, frecuencia, costos, etc.).

Entre los primeros, la Confederación Británica del Transporte Vial de Pasajeros (CPT, 1981) establece que en sectores residenciales las áreas de paradas de buses deberían localizarse considerando las distancias de caminata. De esta forma, la máxima distancia a un paradero debe ser menor que 400 m, lo que implica 5 minutos de caminata a una velocidad media de 80 m/min. Este criterio, unido a la necesidad de proveer una velocidad adecuada a los buses, establece que, en promedio, los paraderos deberían localizarse a razón de 2 o 3 por km. Esto significa paraderos cada 300 a 500 m, cubriendo una franja de 400 m de ancho a cada lado de los recorridos de buses.

Por su parte, el Manual de Tránsito Canadiense (CUTA, 1985) proporciona rangos de espaciamientos de paraderos permitidos y observados. De acuerdo a éste, la distancia mínima entre paraderos debería ser aproximadamente 200 m. y la distancia máxima entre 300 a 400 m. Valores observados en ciudades canadienses, sin embargo, están en el rango de 200 a 250 m. La misma fuente cita límites inferiores y superiores recomendados en Alemania de 250 y 600 m, respectivamente.

Basados en la distancia necesaria para que los buses alcancen su velocidad de crucero, Pretty y Russell (1988) consideran que en el proceso de aceleración y deceleración un bus típico consume, en zonas urbanas, un total de 20 segundos por parada. Considerando una velocidad media de 50 km/h y tasas de aceleración y deceleración de 1.0 y 2.0 m/s, respectivamente,

resulta que los puntos de parada deberían ubicarse, a lo menos, cada 200 m. En general, se establece un rango de 200 a 400 m.

Los criterios brasileños en este sentido están relacionados con el uso del suelo y tipo de vía (EBTU, 1982). Respecto del primero, en áreas residenciales con baja densidad los paraderos deberían ubicarse cada 300 a 500 m. En áreas céntricas, así como en zonas con alta concentración de comercio y servicio o en áreas residenciales de alta densidad, los servicios de buses tienen más demanda y debe proveerse buena accesibilidad. Por lo tanto, las paradas de buses deberían estar espaciadas entre 150 y 300 m.

Desde el punto de vista del tipo de vía, la misma referencia establece que en vías locales o secundarias el espaciamiento no es particularmente relevante, ya que los paraderos no afectan a altos flujos de vehículos. En vías arteriales la influencia de los paraderos sobre el resto del tráfico debe considerarse, evitando un número excesivo de paradas que, combinadas con las intersecciones semaforizadas, aumente significativamente el tiempo de viaje. Una combinación de semáforos coordinados y puntos de parada alternados en cada dirección de la vía podría ser la solución en este caso. La distancia mínima entre puntos de parada para vías arteriales es, no obstante, de 300 m. Finalmente, para vías de alta velocidad los paraderos deben localizarse cerca de los puntos de generación de demanda, donde estén disponibles cruces protegidos.

Aunque todos los criterios anteriores entregan rangos similares y amplios de espaciamiento de paraderos (mínimo 150-300 m, máximo 300-500 m), las consideraciones detrás de estos valores son bastante diferentes. En general, características operacionales, tales como velocidad comercial, demoras por paradero, demanda de pasajeros, etc., no son consideradas. Por lo tanto, surge la necesidad de buscar relaciones entre el espaciamiento de puntos de parada y algunas variables relacionadas con la operación del sistema.

Algunos primeros trabajos relacionados con la localización de puntos de parada en sistemas de transporte público se refieren a ferrocarriles urbanos más que a servicios de buses (Vuchic et al, 1968; Vuchic, 1969).

En estudios posteriores, Hauer (1971) aborda el problema de elección del tamaño y características de la flota para una ruta de transporte urbano. Esto lleva al problema de espaciamiento de puntos de parada a través del tiempo de ciclo de los vehículos. No obstante, no se llega a una relación explícita entre la densidad de paradas y variables de operación. Así, el promedio de detenciones por vehículo, asumiendo que los pasajeros llegan a los paraderos según una distribución de Poisson y que los intervalos entre vehículos son regulares, está dado por las ecs.(2.1) y (2.2).

$$n \approx s \cdot [1 - \exp(-2 \cdot T \cdot \theta / s \cdot N)] \quad (2.1)$$

con: $\theta = t + n\delta$ (2.2)

donde:

n = promedio de detenciones por vehículo en un ciclo

s = número de paraderos en la ruta

N = tamaño de flota

θ = tiempo de ciclo de cada vehículo

T = promedio de viajes generados por unidad de tiempo en la ruta

t = tiempo de viaje sin detenciones

δ = duración media de una detención

Basado en esta especificación se encontró que un aumento en la densidad de puntos de parada reduce rápidamente la distancia de caminata y la velocidad de operación. Por su parte, la ocupación de los vehículos disminuye y aumenta el intervalo medio entre aquellos vehículos que no circulan llenos.

Lesley (1976) considera el rol que juegan los paraderos en la elección de los usuarios desde el punto de vista del costo generalizado de viaje. El espaciamiento óptimo de paraderos que minimiza el costo generalizado de los pasajeros queda expresado por la Ec.(2.3).

$$d = 2 \cdot \left[\frac{\frac{1}{2} \cdot l \cdot v \cdot (1/\alpha + 1/\beta) + \frac{1}{2} \cdot l \cdot c_1}{\frac{1}{2} \cdot l \cdot f \cdot g \cdot \pi \cdot c_2 + 8/(3 \cdot w)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.3)$$

donde:

d = espaciamiento óptimo de paraderos

l = longitud promedio de viaje de los pasajeros

v = velocidad de operación promedio de los vehículos

f = frecuencia del servicio

g = tasa de generación de viajes por unidades de tiempo y área

w = velocidad de caminata promedio de los pasajeros

c_1 = tiempo constante perdido en cada paradero

c_2 = tiempo marginal por pasajero que sube al vehículo

α, β = tasas de aceleración y deceleración de los vehículos

Kikuchi (1985) investigó la relación entre el número de detenciones y el intervalo entre vehículos. El problema considerado fué buscar combinaciones que minimizaran el tiempo total de viaje de los usuarios (tiempos de acceso, espera y viaje), considerando la utilización más eficiente del tamaño de flota. La relación implícita resultante demostró que, aunque el número óptimo de paraderos aumenta rápidamente con el tamaño de flota, el número de detenciones efectivas por vehículo se mantiene relativamente constante. Es decir, los vehículos se abstienen de parar en la mayoría de los paraderos.

Un modelo desarrollado recientemente en Chile (CADE-IDEPE, 1988) considera tres impactos en el espaciamiento óptimo de puntos de parada de buses: tiempo de caminata de los pasajeros, tiempo perdido por los ocupantes del bus y costo de detención del bus.

El costo total de una detención es, entonces, la suma de estos impactos, asumiendo que el costo de operación de los vehículos es dos veces el costo del combustible. Minimizando dicho costo con respecto al espaciamiento de los paraderos se tiene:

$$d^* = \left[\frac{4000 \cdot \mu \cdot q \cdot [2 \cdot P_c \cdot C_d + T_d \cdot (2 \cdot P_c \cdot C_r + T_o \cdot C_p)] \cdot V_p}{P_d \cdot \alpha \cdot C_p} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.4)$$

donde:

d^* = distancia óptima entre paraderos (m)
 μ = proporción de buses que se detiene por paradero
 q = flujo de buses (buses/h)
 P_c = precio social del combustible (\$/lt)
 C_d = consumo unitario de combustible por detención (lt/det)
 T_d = tiempo perdido por detención (seg/det)
 C_r = consumo unitario de combustible al ralenti (lt/seg)
 T_o = tasa de ocupación de los buses (pax/bus)
 C_p = valor del tiempo de los pasajeros (\$/pax-seg)
 V_p = velocidad de caminata de los pasajeros (m/seg)
 P_d = tasa de demanda de pasajeros que suben y bajan (pax/km-h)
 α = ponderador del tiempo de acceso en relación al de viaje

De entre las expresiones explícitas entre espaciamiento de paraderos y variables operacionales la formulación de Lesley tiene la ventaja de su independencia con respecto a los costos de tiempo, combustible y consumos unitarios. Considera sólo variables de operación y demanda de pasajeros.

Por su parte, la Ec.(2.4) considera un rango de impactos más amplio, incluyendo el costo de operación de los vehículos y, por lo tanto, el efecto del espaciamiento de los puntos de parada sobre los operadores.

Estas u otras expresiones pueden ser útiles para el diseño de paraderos. No obstante, el valor del espaciamiento óptimo en un corredor constituye sólo una primera aproximación al problema. Para obtener la localización final de cada paradero es necesario considerar, además, factores geométricos, de comportamiento, etc. Esto se aborda en la sección siguiente.

3. PROCESO DE DECISION EN LA LOCALIZACION DE PARADEROS DE BUSES

En esta sección se aborda el proceso de decisión comprometido en la localización de paraderos con suficiente capacidad. Para tal efecto se analiza, primeramente, una aproximación a dicho proceso utilizando una técnica de modelación estructural que identifica las principales variables de decisión y sus interrelaciones. Esto ayuda, posteriormente, a configurar las etapas del proceso de decisión, los datos, los modelos y las opiniones requeridas.

Para la primera etapa fueron identificadas once variables que intervendrían en el proceso de decisión. Para esto se recurrió,

con algunas modificaciones, a la experiencia brasilera relacionada con esquemas de prioridad para buses (Tyler, 1989b), más aquellos aspectos relevantes para la localización de paraderos analizados en la sección 2. Estas fueron:

- 1) tiempos de acceso y espera;
- 2) velocidad de crucero;
- 3) tiempo de viaje;
- 4) demora en paraderos;
- 5) número de paradas;
- 6) flujo de buses;
- 7) demanda de pasajeros;
- 8) uso del suelo adyacente;
- 9) diseño vial existente;
- 10) localización actual de paraderos;
- 11) diseño de los vehículos.

Las interrelaciones entre pares de estas variables de decisión pueden ser obtenidas mediante una matriz de adyacencia que contiene en filas y columnas las variables identificadas. Si una variable de una columna depende de una variable de una fila, la celda correspondiente contiene un valor unitario. Luego, la columna con más entradas es el objetivo más importante y la fila con más entradas es la variable más influyente (Fig.1).

A partir de la matriz de adyacencia se puede observar que el principal objetivo para establecer paraderos de alta capacidad es la reducción del tiempo de viaje. Por su parte, la variable que más influye en tal decisión es la demanda de pasajeros.

Con la información contenida en la Fig.1 es posible construir un grafo equivalente. Este grafo representa la misma información de la matriz de adyacencia donde se han depurado la duplicación de interrelaciones entre pares de variables y quedan de manifiesto los ciclos dentro del proceso. Esto se muestra en la Fig.2.

Basado en el grafo equivalente se puede derivar un diagrama semántico del proceso de decisión de la localización de los PACs. Se puede notar que la primera etapa corresponde a una evaluación del tiempo de viaje actual en un tramo de la vía bajo análisis. Esto conduce a la cuestión del espaciamiento óptimo de los paraderos considerando los tiempos de acceso, de espera y el diseño vial imperante. Luego, estas características son definidas por el uso del suelo adyacente más un conjunto de variables de operación interactuando entre sí.

De esta forma, el proceso de decisión en su conjunto puede subdividirse en tres etapas. Una primera etapa de diagnóstico, basado en el tiempo de viaje de los buses. Luego, una etapa de diseño donde los PACs son definidos en cuanto a diseño y localización, considerando variables de operación y sus restricciones. Finalmente, debe existir una etapa de evaluación de las decisiones adoptadas, bajo la misma perspectiva del diagnóstico: tiempo de viaje.

Para la etapa de diseño, la cual involucra interrelaciones entre la mayoría de las variables de decisión, puede identificarse un conjunto de subetapas. La experiencia utilizada para definir estas subetapas proviene de investigaciones realizadas en el país (Gibson, 1988).

Finalmente, el proceso de decisión general para la localización de PACs puede ser resumido por el diagrama semántico de la Fig.3.

4. EL SISTEMA EXPERTO BUSTOPS

Definido el proceso de decisión para la localización de PACs, es posible transformar este proceso en un sistema experto simple. Este sistema fué diseñado para dar una primera aproximación a la solución del problema analizado, a nivel de diseños preliminares.

La asesoría entregada por este sistema experto es la equivalente a preguntar a un experto humano cuál podría ser la localización y diseños más apropiados de PACs en un corredor de locomoción colectiva, dada la información acerca del diseño vial existente, del flujo de buses, de la demanda de pasajeros, del uso del suelo adyacente y de otras variables operacionales.

La imagen de tal asesoría podría ser la de llamar a un ingeniero especialista en la materia a alguna oficina de planificación de transporte público y preguntarle, sobre un plano del eje, dónde ubicar paraderos de buses y cómo acomodar los lugares de parada en ellos. El especialista probablemente preguntará por algunos datos generales de la operación de la locomoción colectiva en el corredor y entregará una solución global, junto con alguna evaluación preliminar de los mejoramientos. Obviamente, a este nivel no se producirá ningún diseño ni resultado detallado. El resultado más probable, luego de mutuas consultas entre el experto y el cliente, será una visión general del problema, junto a sugerencias de diseños y localizaciones de PACs. Con posterioridad a esta asesoría, podrán conducirse estudios de terreno, utilizarse modelos específicos y generarse diseños más acabados para afinar la solución a nivel de proyecto.

Para lograr este objetivo el sistema experto BUSTOPS está dividido en siete programas independientes, escritos en lenguaje TURBO PROLOG 2.0, los que pueden ser utilizados separadamente para permitir flexibilidad en el proceso de asesoramiento. La estructura general del sistema se muestra en la Fig.4.

El sistema es interactivo y autoexplicativo. Los datos y resultados son comunicados a través de la pantalla del computador, de modo que ningún archivo de resultados es producido. La asesoría se da en la forma de una "conversación" con el experto en la cual el usuario toma nota de las sugerencias dadas por el experto, pero este último no proporciona ningún reporte escrito para el cliente (Fig.5).

A continuación se describen brevemente cada uno de los

subprogramas del sistema en cuanto a su objetivo y modelos en los que se basan.

El programa DIAGN determina el impacto de la frecuencia de las detenciones sobre la velocidad comercial de los buses en el eje. Para ello, utiliza una relación exponencial decreciente entre ambas variables (Gibson, 1988). A partir de este resultado emite una opinión acerca del nivel de servicio entregado por los buses y cómo éste podría ser mejorado. Además, entrega la clase de problemas que se pueden presentar en el corredor, dadas las proporciones relativas de buses y autos, y cómo deberían abordarse (Gibson et al, 1989).

El programa STOPS entrega el espaciamiento óptimo de los paraderos considerando la minimización del costo generalizado de transporte de los pasajeros. Esto se basa en una simplificación al modelo desarrollado por Lesley (Ec.(2.3)) y constituye sólo un valor de referencia para la localización de los PACs (Fernández, 1990):

$$D_o = \left[\frac{12 \cdot t_c}{3 \cdot \pi \cdot \beta_1 \cdot (p/q) + 10/1} \right]^{1/4} \quad (4.1)$$

donde:

D_o = espaciamiento óptimo de paraderos (m)

t_c = $\beta_0 + l_o$: tiempo aproximado de despeje del paradero (usualmente, 10-15 seg)

β_0 = tiempo constante perdido en cada paradero (seg)

β_1 = tiempo marginal de subida al vehículo (seg/pax)

$l_o = \frac{4 \cdot v \cdot (1/\alpha + 1/\beta)}{\alpha \cdot \beta}$: tiempo perdido en el ciclo de aceleración/desaceleración (seg)

α = tasa de aceleración promedio de los vehículos (m/seg²)

β = tasa de desaceleración promedio de los vehículos (m/seg²)

$p = 4 \cdot P / \pi \cdot d^2$: tasa de demanda de pasajeros, asumiendo un área de captación circular en torno a los paraderos (pax/h-m²)

P = demanda total de pasajeros por paradero (pax/h)

d = espaciamiento medio actual de los paraderos en el tramo (m)

Como simplificación adicional a la Ec.(4.1) se ha supuesto una velocidad de caminata de los pasajeros igual a 1.6 m/seg.

El programa GROUP da una opinión acerca del número de puntos de parada en los cuales debería dividirse el área de parada (PAC) para acomodar el flujo de buses y la demanda de pasajeros. El criterio utilizado corresponde a experiencias brasileras (EBTU, 1982).

El programa BERTH indica el número de sitios que son requeridos para acomodar los buses en cada uno de los puntos de parada necesarios en el PAC. Para tal efecto, utiliza un modelo basado en experiencias chilenas (Gibson, 1988, CADE-IDEPE, 1988).

El programa SPACE indica el espacio requerido para diseños

alternativos de los PACs. Este sistema considera dos diseños posibles según recomendaciones brasileras (EBTU, 1982): puntos de parada alternados (paradas diferidas) y puntos de parada en paralelo (doble andén).

El programa LOCAT asesora acerca de la localización de los PACs a lo largo del corredor, considerando tramos de vía definidos entre el PAC de aguas arriba (previamente establecido) y el siguiente (por definirse). El criterio consiste en minimizar la distancia entre el principal punto de demanda de viajes existente en el tramo (plaza, centro comercial, estación, calle principal, etc.) y el PAC por establecerse, sujeto a restricciones de espacio físico y de espaciamiento óptimo de paraderos (Fernández, 1990):

$$\text{Min } Zi = | Xoi - Xi | \quad (4.2)$$

$$\begin{aligned} \text{s.a. } Lj(Xi) &\geq Lj \\ Wj(Xi) &\geq Wj \\ Xi - Xi-1 &\geq Do \end{aligned}$$

donde:

Xi = ubicación factible del PAC en el tramo i bajo análisis
Xoi = ubicación del principal punto de demanda para este tramo
Xi-1 = ubicación del PAC definido en el tramo i-1 de aguas arriba
Lj(Xi) = longitud disponible para el diseño j en la localización Xi
Wj(Xi) = ancho disponible para el diseño j en la localización Xi
Lj = longitud requerida para el diseño j
Wj = ancho requerido para el diseño j
Do = espaciamiento óptimo de los paraderos en el eje

El programa, de esta manera, trata de compatibilizar la posición de los PACs con la de los principales puntos generadores de demanda, de modo de proveer buena accesibilidad al transporte público. Asimismo, procura que esta accesibilidad sea compatible con el espacio físico para asegurar buenos diseños operacionales. Al mismo tiempo, busca que el espaciamiento entre paraderos tienda a minimizar el costo generalizado de los pasajeros. Esto último se logra mejor, fuera del óptimo, distanciando los paraderos más allá de Do, dado el comportamiento de la función de costos con respecto al espaciamiento (Fernández, 1990).

Las opiniones del experto, en este caso, son la ubicación recomendada del PAC en el tramo, su diseño más adecuado, así como otras observaciones generales acerca de la calidad de la solución alcanzada. Basándose en ellas el cliente podría tomar otras decisiones y consultar nuevamente al experto.

El programa EVALU establece los beneficios de la implementación de PACs en el eje, con respecto a la situación base. Los beneficios se refieren a cambios en la velocidad comercial en el corredor, debido a cambios en el número de paraderos en el eje, basados en el mismo modelo utilizado en la etapa de diagnóstico. El experto emite también su opinión respecto de estos beneficios

y, de ser necesarias, otras recomendaciones en cuanto a como mejorar la operación de los buses mediante otras medidas.

5. APLICACION Y RESULTADOS

Con el objeto de probar el sistema experto BUSTOPS se efectuó una aplicación sobre un sector del corredor Avda. B. O'Higgins de la ciudad de Concepción (Chile). Los datos de operación del transporte público utilizados corresponden a un reciente estudio encargado por la Secretaría Ejecutiva de la Comisión de Transporte Urbano (Testing, 1990).

El corredor O'Higgins es la principal calle unidireccional del centro de la ciudad de Concepción, la que se ubica en dirección NE-SW, con una longitud total de 2.12 km y con un ancho medio de 12 m.

La demanda de tráfico de este eje está compuesta por aproximadamente 250 taxibuses por hora y 30 buses por hora, la que se mantiene más o menos constante a lo largo del día. Los flujos de transporte privado (autos, camionetas, etc.) varían temporal y espacialmente entre 120 y 860 veh/h.

El corredor presenta uno de los mayores flujos de pasajeros, concentrados durante las horas punta de la mañana, mediodía y tarde (1800 a 7800 pasajeros por hora). Durante los períodos punta del mediodía y tarde hay una demanda predominante de pasajeros abordando locomoción colectiva, con más de 400 pasajeros por hora en el paradero con más carga. En la mañana esta situación se invierte. Existen también 33 rutas de transporte público hacia 3 destinos principales (Talcahuano, Chiguante y San Pedro).

Los índices de operación generales para el transporte público en el eje muestran una velocidad comercial menor o igual a 9 km/h en los períodos punta del mediodía y de la tarde. Para la punta de la mañana ésta es de 17.6 km/h. Por su parte, la velocidad comercial para el transporte privado varía, temporal y espacialmente, entre 16 y 31 km/h.

El área de aplicación correspondió a un sector del corredor de 1.4 km de longitud y un promedio de 4 pistas de circulación en un mismo sentido. Presenta un flujo de buses constante y los más altos niveles de demanda de pasajeros y flujo de vehículos particulares. Corresponde, por lo tanto, al sector del eje con los mayores problemas derivados de la congestión en paraderos, unido a una pobre gestión de tránsito.

En el periodo de mayor demanda existe, en el tramo en cuestión, un flujo de 280 buses (taxibuses y buses) por hora y un promedio de 670 vehículos livianos por hora. El tramo presenta 9 intersecciones semaforizadas, además de 7 paraderos (autorizados o no) donde los buses podrían sufrir detenciones y demoras.

Con la información precedente BUSTOPS predijo una velocidad comercial de 7 km/h para ese sector. El experto establece también que, dadas las proporciones relativas de buses y autos, existiría una situación de prioridad de hecho en la cual los buses tenderían a utilizar una o más pistas para su uso exclusivo. Por lo tanto, recomienda que el mejoramiento en la situación de los paraderos parece una medida atractiva para proveer suficiente capacidad en esos puntos críticos. Finalmente, considera que la actual velocidad comercial es mala, por cuanto es menor a 10 km/h, pero que una reducción equivalente a una parada por kilómetro podría mejorar en un 15% el actual nivel de servicio.

Posteriormente, con los otros datos entregados por el cliente, el experto establece que el distanciamiento óptimo entre paraderos para el tramo es de 192 m. Luego define que, para acomodar el flujo de buses y demanda de pasajeros, el diseño básico corresponde a 2 puntos de parada con 3 sitios cada uno, para cada uno de los PACs a establecerse.

Esto, más el largo y ancho de cada sitio según el tipo preponderante de vehículos de locomoción colectiva en el corredor (8 y 3.5 m, respectivamente), además del ancho mínimo de las plataformas (2 m), indica el espacio mínimo requerido para disposiciones alternativas de los sitios. Así, para paradas alternadas se requieren de un largo de 84 m y de un ancho de 5.5 m (462 m²). Para plataformas paralelas es necesario un largo de 24 m y un ancho de 11 m (264 m²). Por lo tanto, el experto recomienda esta última opción donde sea posible.

Con estos datos BUSTOPS procede a localizar los PACs, partiendo desde el inicio del tramo bajo análisis y siguiendo hacia aguas abajo, según la localización de los principales puntos generadores de demanda de viajes y el espacio disponible. Este último compuesto por el ancho entre líneas de edificación, menos los espacios reservados para los peatones y el resto del tráfico, además del largo del arco.

En este sector de Avda. O'Higgins se identificaron 4 puntos relevantes generadores de viajes : entre Tucapel y Castellón (Plaza de Los Tribunales), entre A.Pinto y Caupolicán (Plaza de Armas), entre Rengo y Lincoyán y entre Lincoyán y Angol. Como resultado, la decisión del experto consistió en localizar 4 PACs ubicados en los arcos Tucapel-Castellón, Colo Colo-A.Pinto, Rengo-Lincoyán y Angol-Salas. El primero de éstos tiene una configuración de doble andén (Fig.6) y el resto tienen un diseño de andén único con puntos de parada alternados (Fig.7).

Como resultado sólo de la reducción del número de paraderos en el tramo el experto estimó como beneficios preliminares de la implementación de PACs un aumento en la velocidad comercial de los buses de 7 a 9 km/h, correspondiente a un incremento de un 29%. Sin embargo, él estima que esta velocidad es aún un tanto baja y recomienda considerar, además, otras medidas como pistas sólo bus con suficiente capacidad y prioridad para los buses en las intersecciones semaforizadas.

No obstante esta última conclusión, es importante destacar que los únicos beneficios que se han evaluado son aquellos provenientes de la frecuencia de las detenciones. En paraderos con altos grados de congestión iniciales, como es el caso analizado, diseños como los propuestos significarán beneficios considerablemente mayores al reducir, además, la congestión interna en los paraderos.

Consecuentemente, luego de la asesoría entregada por BUSTOPS otros estudios y diseños detallados deberían ser considerados. Para tal objetivo, otras herramientas computacionales pueden ser utilizadas, tales como el programa IRENE de diseño de paraderos (Gibson et al, 1989) u otros sistemas expertos relacionados con diseño de esquemas de prioridad para buses (Tyler, 1989b).

6. CONCLUSIONES

En términos generales, con este trabajo se ha dado un primer paso hacia el objetivo de contribuir al desarrollo de sistemas expertos aplicados a la gestión de paraderos en presencia de altas demandas. El proceso de decisión involucrado en este problema pudo ser definido en el contexto subyacente. Esto permitió desarrollar el proceso en la forma de un sistema experto simple. El experto diseñado proveyó una adecuada asesoría respecto del problema y sus sugerencias fueron validadas con un experto humano, arrivando a conclusiones muy similares.

Quedaron también de manifiesto algunas ventajas de utilizar sistemas expertos para abordar estos y otros problemas relativos a la gestión de tránsito. En particular, considerando el contexto en que se desenvuelve el transporte público en países en vías de desarrollo, el uso y transferencia de experiencias mediante modelos basados en opiniones parece presentar algunos beneficios comparados con modelos puramente algorítmicos.

Con respecto a los modelos y opiniones utilizados por este sistema experto, podrían introducirse varias mejoras de acuerdo con los resultados obtenidos en subsiguientes aplicaciones. La comparación entre estos resultados y algunos modelos de simulación podrían, del mismo modo, proveer antecedentes para lograr estas mejoras. Asimismo, la incorporación de nuevas fuentes de experiencia, enfoques y criterios, así como la modificación de las actuales para abordar el problema, deben ser consideradas en futuras depuraciones del sistema. Esto no resta valor al sistema actual que debe considerarse como un prototipo, el que ha demostrado su operatividad.

Finalmente, en una perspectiva más amplia, parece atractivo extender la investigación sobre utilización de sistemas expertos hacia los dos extremos del campo de la ingeniería de transporte donde la experiencia y transferencia tecnológica juegan un rol relevante, esto es, en las áreas de diseño de infraestructura de transporte y planificación de transporte.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio fué realizado como parte de los requisitos para obtener el grado de Master of Science de la Universidad de Londres. El autor manifiesta su gratitud a los miembros del Transport Studies Group, University College London, en especial al Dr. Neil Hoose, supervisor del estudio, y a Nick Tyler por sus invaluables comentarios.

REFERENCIAS

BLINKHORN, M. (1985) *Expert systems in transport engineering*. Msc Thesis, University of London.

CADE-IDEPE (1988) Estudio de investigación de metodología de análisis y seguimiento de transporte público. Informe Final Intendencia de la Región Metropolitana, Santiago.

CPT (1981) *Urban planning and design for road public transport*. Confederation of British Road Passenger Transport, London.

CUNDIL, M.A. y WATTS, P.F. (1973) Bus boarding and alighting times. Transport and Road Research Laboratory Report LR 521. TRRL, Crowthorne.

CUTA (1985) *Bus stops and terminals*. Canadian Transit Handbook, Chapter 11. Canadian Urban Transit Association, Toronto.

EBTU (1982) Tratamento preferencial ao transporte coletivo por onibus. Empresa Brasileira dos Transportes Urbanos, Brasilia.

FERNANDEZ, R. (1990) *Expert systems: application to the location of high-capacity bus stops*. MSc. Thesis, University of London.

GIBSON, J. (1988) Modelación macroscópica de la circulación de buses con prioridad de hecho. Informe Técnico, Proyecto Fondecyt 286/87. Santiago.

GIBSON, J., BAEZA, I. y WILLUMSEN, L.G. (1989) Bus-stops, congestion and congested bus-stops. *Traffic Engineering and Control*, 30(6), 291-296.

HAUER, E. (1971) Fleet selection for public transportation routes. *Transportation Science*, 5(1), 1-21.

KIKUCHI, S. (1985) Relationship between the number of stops and headway for a fixed-route transit system. *Transportation Research*, 19A(1), 65-71.

LESLEY, L.J.S. (1976) Optimum bus-stop spacing. *Traffic Engineering and Control*, 17(10,11), 399-401, 472-475.

PRETTY, R.L. y RUSSEL, D.J. (1988) Bus boarding rates. *Australian Road Research*, 18(3), 145-152.

SMITH, P.R. (1988) Expert system development in PROLOG and TURBO PROLOG. *Sigma Press, Wilmson, Cheshire.*

STEER, J.K. (1979) Factors influencing the planning and design of bus terminals. *Traffic Engineering and Control*, 20(8/9), 406-409.

TESTING (1990) Estudio de mejoramiento de la gestión de tránsito en la red centro de Concepción. Informe Final, Comisión de Transporte Urbano, Concepción.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (1985) Highway capacity manual. Special Report 209. National Research Council, Washington DC.

TYLER, N.A. (1989a) The contribution of expert opinions to the design of high capacity bus priority systems. International Conference on the Application of Artificial Intelligence Techniques to Civil and Structural Engineering, London, September 1989.

TYLER, N.A. (1989b) The transfer of infrastructure technology for capacity enhancement in urban bus systems. Note of Transport Studies Group, University College London (unpublished).

TYLER, N.A. y WILLUMSEN, L.G. (1989) Infrastructure design: an approach to bus priority systems using artificial intelligence techniques. Control, Computers, Communications in Transportation Symposium, Paris, September 1989.

VUCHIC, V.R. (1969) Rapid transit interstation spacing for maximum number of passengers. *Transportation Science*, 3(3), 214-232.

VUCHIC, V.R. y NEWELL, G.F. (1968) Rapid transit interstation for minimum travel time. *Transportation Science*, 2(4), 303-339.

WILLUMSEN, L.G. (1988) El diseño de pistas sólo bus con ayuda del computador. V Congreso Panamericano de Ingeniería de Tránsito y Transporte, Mayagüez, Julio 1988.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
1		1	1	1	1	1			1	1	1	
2	1		1	1	1	1			1	1	1	
3												
4	1		1			1			1	1		
5	1	1	1			1			1			
6	1	1	1	1	1				1	1	1	
7	1	1	1	1	1	1			1	1	1	
8	1		1						1	1		
9	1		1						1			
10	1	1	1	1	1	1			1		1	
11	1	1	1	1	1	1			1	1		

Fig.1: Matriz de adyacencia para la localización de PACs.

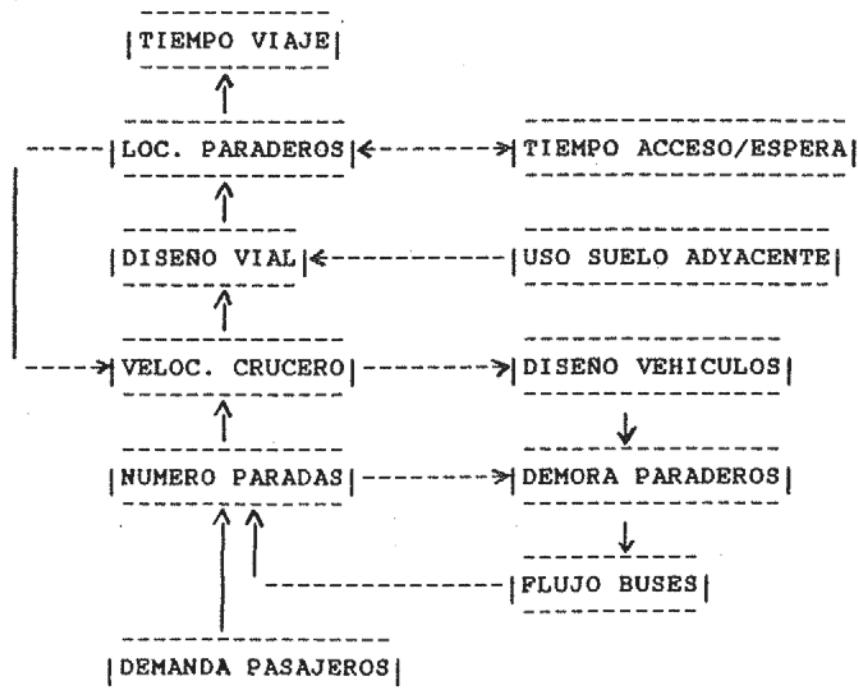


Fig.2: Grafo equivalente para la localización de PACs.

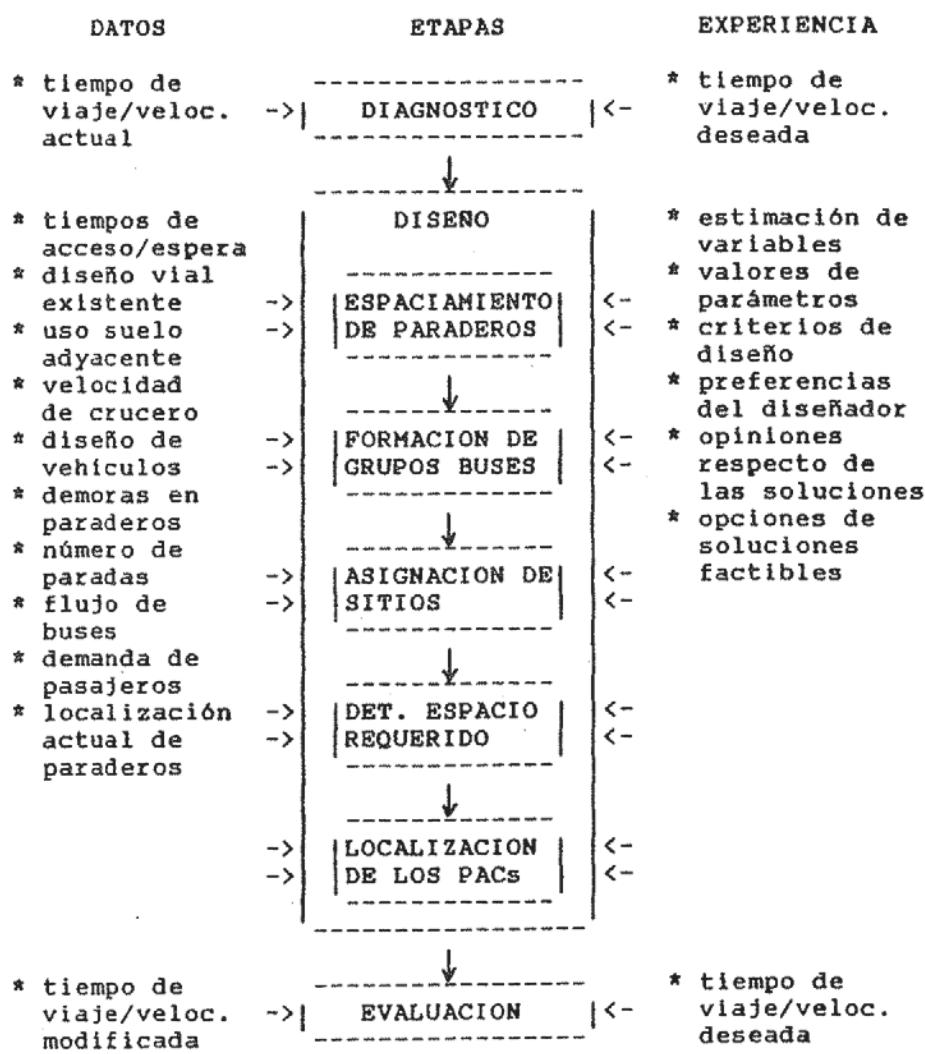


Fig.3: Diagrama semántico del proceso de localización de PACs.

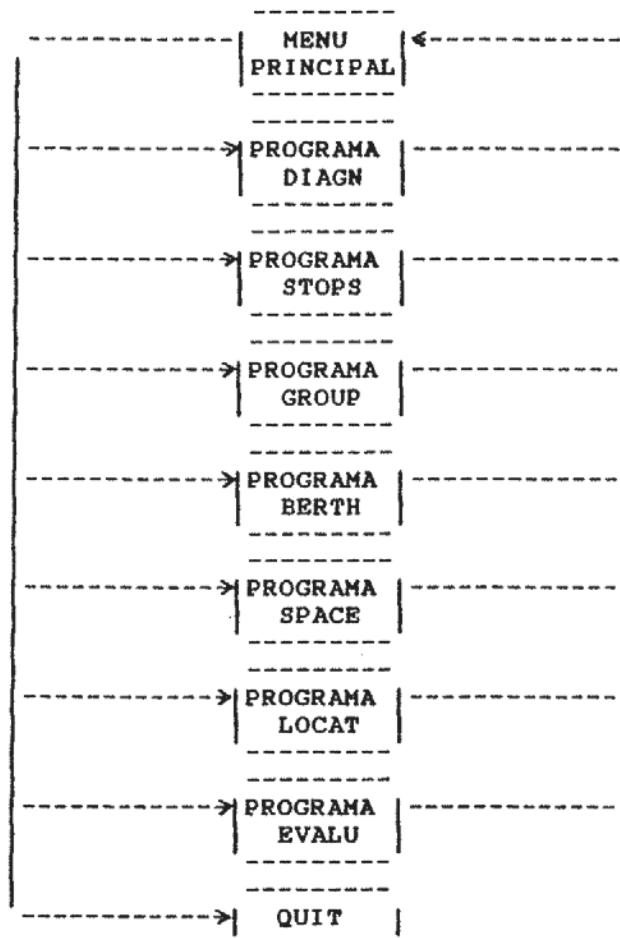


Fig.4: Diagrama de flujo del sistema experto BUSTOPS

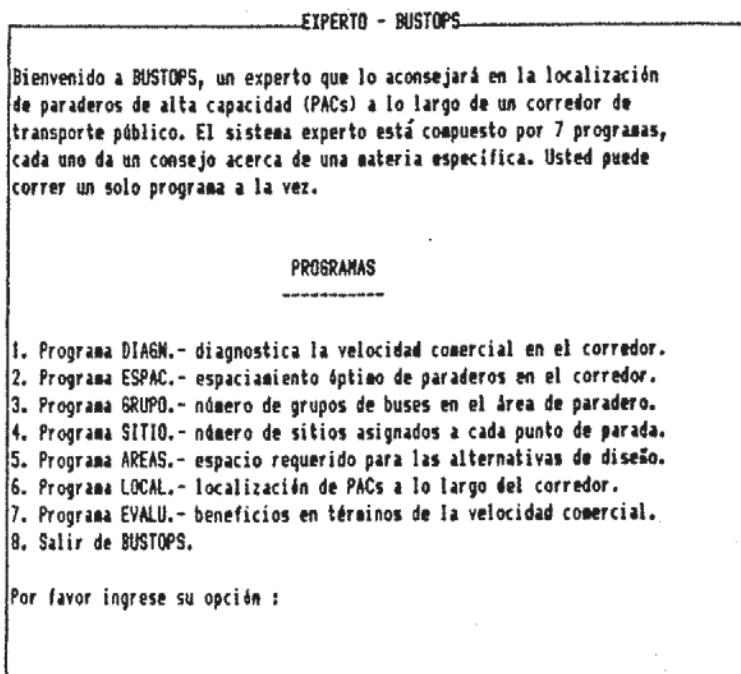
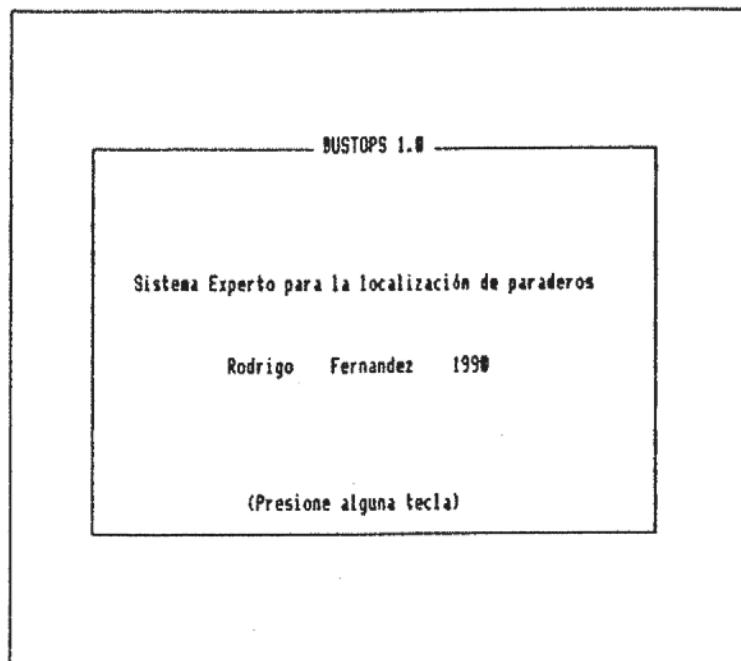


Fig.5: Ejemplo de salidas del sistema experto BUSTOPS
397

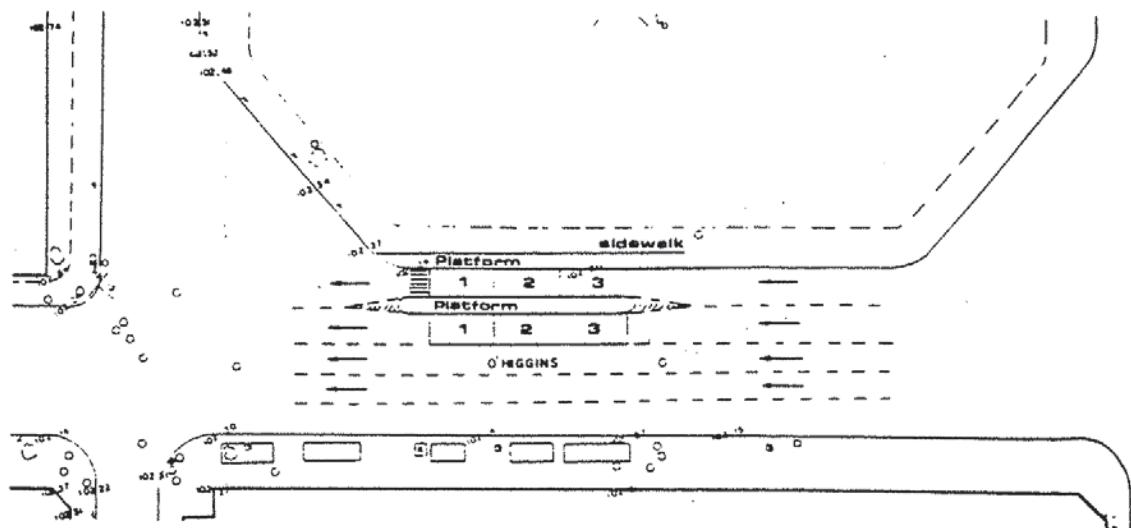


Fig.6: Paradero de Alta Capacidad Tucapecel-Castellón

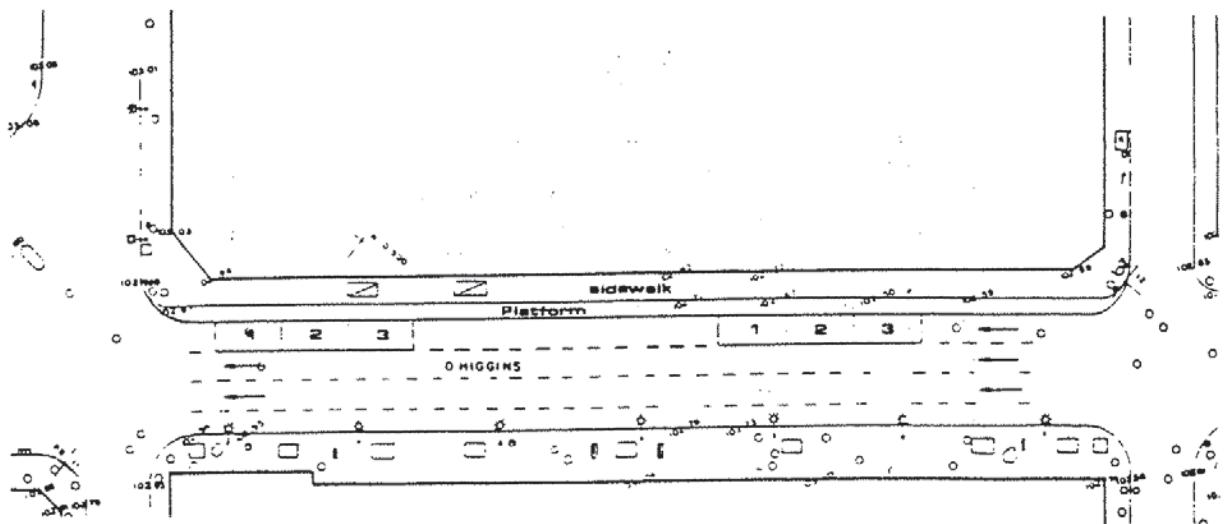


Fig.7: Paradero de Alta Capacidad Colo Colo-Aníbal Pinto
398