

CRITERIOS PARA LA IMPLEMENTACION DE PISTAS  
SOLO-BUS EN ARTERIAS URBANAS DE ALTO FLUJO

Luis Antonio Lindau  
Escola de Engenharia  
Universidade Federal  
do Rio Grande do Sul

Resumen

Antes de implantarse una medida prioritaria para la circulación de los ómnibus es necesario estudiar su adecuación al medio. Este trabajo presenta los principales métodos para investigar la aplicación de pistas para ómnibus en vías urbanas y sistemas de detección de ómnibus en intersecciones controladas por semáforos: consultas a reglas generales, utilización de modelos simulados, realización de testes en laboratorios y comparación con medidas similares ya implantadas. La revisión bibliográfica indicó que la potencialidad de pistas exclusivas para ómnibus junto al cantero central no habia sido debidamente explorada. Un modelo microscópico, denominado SIBULA, fue desarrollado y utilizado en la evaluación de diferentes configuraciones operacionales que incluyen la simulación del desplazamiento de convoyes ordenados de ómnibus.

## 1. Introducción

El crecimiento populacional ocurrido en la mayoría de las grandes ciudades de los países en vías de desarrollo acarretó una demanda creciente de los servicios de transporte urbano. En estos países, muchas veces los ómnibus constituyen la única modalidad ofrecida para el transporte de pasajeros en áreas urbanas. Se estima que en 1980 eran realizadas, diariamente, 600 millones de viajes en ómnibus solamente en ciudades del tercer mundo, siendo que hasta el año 2000 esta cifra deberá, por lo menos, ser duplicada (Banco Mundial, 1985).

Las altas inversiones necesarias para la construcción de sistemas de alta capacidad sumados a la grave crisis económica que está vigente en la mayoría de los países en desarrollo, prácticamente impiden nuevas implantaciones de recursos en modalidades del tipo "subterráneo" y tren suburbano. En consecuencia, se hace necesario desenvolver técnicas que permitan aumentar la capacidad ofrecida por el sistema de ómnibus.

Este trabajo enfoca los criterios establecidos para la implantación de pistas exclusivas para ómnibus, la técnica más comúnmente adoptada por los órganos gerenciadorees del transporte público al dar prioridad a la circulación de los ómnibus en áreas urbanas. Son también abordados algunos de los modelos utilizados para investigar la detección de ómnibus en las intersecciones controladas por semáforos.

## 2. Análisis de las Prioridades para Omnibus

Con la introducción de medidas prioritarias para la circulación de los ómnibus se tiene por objetivo, entre otros: incrementar la movilidad por medio de la utilización más eficiente de la vías, propiciar una alternativa al uso de los automóviles privados, reducir el costo operacional de los ómnibus, y garantizar un mejor atendimento a los usuarios cautivos del transporte público. Antes de implantarse una medida prioritaria se hace necesario estudiar su adecuación. Esta investigación debe ser realizada através de uno o varios de los siguientes métodos: consulta a reglas generales, utilización de modelos simulados, realización de pruebas de laboratorio y comparaciones con medidas similares ya implantadas.

### 2.1. Reglas generales

Dentro de las reglas generales más comúnmente utilizadas para justificar la implantación de medidas prioritarias se incluye aquella que defiende la reserva de una pista para ómnibus cuando el volumen de pasajeros transportado por el ómnibus suplanta el llevado por los automóviles en las demás pistas, o sea (Vuchic, 1981),

$$q_o > \frac{q_a}{N-1} \left( \frac{p_a}{p_o} \right)$$

donde  $q_a$  y  $q_o$  son, respectivamente, los volúmenes horarios de automóviles e ómnibus,  $N$  es el número de pistas de tráfico localizadas en un sentido de desplazamiento,  $p_a$  y  $p_o$  expresan la medida de ocupación de automóviles y ómnibus.

Criterios de uso generalizados estipulan un volumen mínimo de 30



a 90 ómnibus por hora para la instalación de una pista de ómnibus (Levinson et alli, 1975). Antiguas recomendaciones americanas (Committee 3-D of the institute of Traffic Engineers, 1959) establecen un volumen mínimo de 60 a 75 ómnibus por hora de pico para justificar, respectivamente, la implantación de una pista para ómnibus junto a la vereda y a lo largo del cantero central de la vía. O Greater London Council (Allen, 1973) formuló algunas recomendaciones para ser incluida en la evaluación de la viabilidad de pistas para ómnibus. Entre las mismas se incluyen aspectos referentes a la conservación del medio ambiente, la cuestión de los accidentes, policiamiento, etc.

## 2.2. Modelos de simulación

Modelos simulados son utilizados tanto en la elaboración de criterios de aplicación generalizada como para evaluar la implantación de una medida prioritaria para ómnibus de un local específico. Entre los primeros grupos de modelos se incluye un desenvuelto en Francia, por Delgoffe (1972) que relaciona el volumen mínimo de ómnibus que justifica una pista reservada para ómnibus con el número de pistas de tráfico disponibles, el nivel de saturación de la vía y la ocupación media de los ómnibus. Freebault, en trabajo descripto por Richardson y McKenzie (1976), elaboró un modelo para verificar las ventajas de la implantación de pistas para ómnibus en términos de la reducción colectiva de los tiempos de recorrido de todas las clases de usuarios. Ambos trabajos indican que flujos horarios mínimos de la orden de 25 a 80 ómnibus son necesarios para justificar la implantación de pistas para estos vehículos.

Olfield et alli (1977) formuló un modelo para examinar, desde el punto de vista económico, la implantación de pistas a lo largo del flujo. Con base en la simulación de un trecho de vía separando sucesivas intersecciones semaforizadas y teniendo en cuenta la posibilidad de ocurrencia de transferencia de algunos vehículos para vías paralelas, fueron producidos criterios generales para la implantación de pistas para ómnibus e para ómnibus y taxis, ambas junto a el cordón e interrumpidas antes de la intersección semaforizada. Los resultados indican la necesidad de que ocurra un flujo en la pista de 90 a 235 ómnibus por hora para justificar la prolongación de pistas exclusivas hasta la intersección. Para flujos abajo de este, se recomienda la interrupción antes de la intersección. Ritchie (1978) adaptó este modelo para las condiciones Australianas.

Al tentar la formulación de criterios generalizados para evaluar la adecuación o no de un determinado local para la implantación de pistas del tipo contra-flujo, Bly y Webster (1977) se observó que los resultados producidos eran tan sensibles a las características de la red viaria y a las particularidades de las intersecciones que no podrían ser extrapoladas para situaciones donde las características del local de implantación no coincidiesen con uno de los simulados.

Una vez que se tenga determinado, através de un criterio generalizado, que un local presenta condiciones potenciales para la implantación de una medida prioritaria para ómnibus, es recomendable realizar un estudio mas específico. Con el desenvolvimiento de los computadores de alta capacidad y velocidad, se consolidó la tendencia de utilizar la



técnica de simulación digital para modelado del comportamiento de flujo de tráfico. Los modelos referentes a seguir son aplicados a intersecciones y trechos de vía entre intersecciones, empleando relaciones macroscópicas (velocidad - flujo) o microscópicas para simular el desplazamiento de los vehículos. Para la reevaluación de las características del flujo de tráfico son adoptados los intervalos incrementales de tiempo o la ocurrencia de eventos pre-específicos.

Muzyka (1975) describe la aplicación del modelo SCOT, formulado a partir de los programas UTCS 1 y DAFT, en la simulación microscópica del flujo de tráfico en una parte del área central de Minneapolis. El modelo fue utilizado en la evaluación de diferentes estrategias de control através de resultados genéricos referentes al desempeño medio de las diferentes clases de vehículos en la malla viaria y usaba datos mas específicos que incluyen la trayectoria detallada de cada ómnibus. Richardson y MacKenzie (1976) alegaron que el proceso de alocación del tráfico embutido en SCOT imposibilita su utilización dentro de la proposición original, que consiste en la evaluación de los impactos causados en toda la red viaria.

Salter y Memon (1977) simularon la operación del tráfico a lo largo de una vía urbana dotada de tres semáforos y dos pistas en cada sentido, en Bradford. Para investigar los efectos de una pista para ómnibus a lo largo del flujo y junto a la vereda, fue simulada la operación con y sin pista. El modelo no considera movimientos de conversión a la derecha y la posibilidad de vehículos efectuar cambios de pistas o adelantarse a otros vehículos mas lentos. El modelo, del tipo microscópico, también no lleva en consideración el tiempo de permanencia de los ómnibus en los puntos de embarque y desembarque de pasajeros. En situaciones que se caracterizan por un gran volumen horario de ómnibus se cree que los tiempos de recorrido sean fuertemente influenciados, por factores que incluyen, entre otros, el número de ómnibus que puede ser simultaneamente atendido en una parada.

Salter y Shahi (1979) describen el aprimoramiento del modelo anterior, donde la investigación de los efectos de pistas para ómnibus para los demas vehículos de la vía queda restringida a las intersecciones. La velocidad de desplazamiento de los ómnibus entre intersecciones es obtenida através de relaciones velocidad - flujo. Una simulación microscópica que reevalua las características cinemáticas de los ómnibus a intervalos fijos de tiempo es utilizada solamente en las proximidad de las intersecciones. Apesar de las limitaciones inherentes a su concepción, el modelo fue utilizado para evaluar entre otras, la posibilidad de los ómnibus adherirse a horarios pre-especificados.

Ericksen (1973) procuró desenvolver un modelo que posibilite la evaluación de diferentes configuraciones operacionales para el sistema ómnibus en áreas centrales. Su ruta de testes consistia de doce intersecciones semaforizadas y cuatro a ocho puntos de parada de ómnibus. El modelo evalua el tiempo acumulativo de ocurrencia de los eventos. Entretanto los datos de entrada referentes al intervalo de tiempo transcurrido entre a pasada de sucesivos ómnibus y la llegada de sucesivos pasajeros en los puntos de parada fueron basados en observaciones de campo, poco esfuerzo fue desperdiciado en el modelaje de los tiempos de recorrido entre intersecciones que, de acuerdo con los resultados presentados, representa mas de 50% del tiempo total del viaje. El modelo



tiene aplicación limitada pues también no permite la simulación de otros vehículos que transitan en la ruta.

Bowes y Mark (1977) describieron el modelo BLOSSIM desarrollado para simular el comportamiento de los ómnibus a lo largo de una pista para ómnibus en Ottawa. El modelo representa microscópicamente los ómnibus, siendo los efectos de los demás componentes del tráfico introducidos a través de coeficientes. Diferentes estrategias operacionales, incluyendo la utilización de paradas alternadas y variación en la localización de los puntos de ómnibus, fueron testadas en una vía con aproximadamente un kilómetro de largo y seis intersecciones. Los autores concluyeron recomendando el refinamiento, la validez y algunas modificaciones en el modelo. No fue considerado el impacto causado por el flujo de los ómnibus en los demás vehículos.

Radelat (1973) desarrolló el modelo denominado SUB, que fue utilizado para evaluar medidas prioritarias para ómnibus a lo largo de vías arteriales urbanas. Este modelo también no posibilita la representación detallada del comportamiento de otros vehículos, pues estos circulan entre intersecciones a velocidad constante pre-especificada por el usuario. El autor considera que las alteraciones introducidas por los ómnibus en el flujo de tráfico son significativas. A pesar de eso, se parte del principio que estas alteraciones no tendrán repercusión de nuevo en el sistema de ómnibus. Los ómnibus son simulados microscópicamente y el modelo es reevaluado de acuerdo con la llegada de los ómnibus en las intersecciones y puntos de parada. La conclusión del trabajo señala la necesidad de ejecución de una larga serie de aplicaciones para dar validez al modelo.

Bly (1973) describe un modelo desarrollado para simular una única aproximación de un semáforo aislado con tiempo fijo. El modelo fue utilizado para investigar situaciones complementares a los testes de campo realizados en la pista experimental de TRRL (Coburn et alii, 1973). Para la calibración y validez del modelo fueron utilizados tanto datos obtenidos en la pista experimental como datos obtenidos de una intersección de Londres. El autor concluyó que la operación durante las condiciones de saturación de la aproximación es suficientemente complicada para impedir la formulación de reglas simples que indiquen la distancia óptima entre el final de la pista para ómnibus y la intersección.

Gaham (1973) utilizó un modelo desarrollado en los Estados Unidos al evaluar los efectos de la introducción de una pista para ómnibus en una vía arterial de Dublin. Este modelo fue originalmente desarrollado para simular los tiempos de recorrido de vehículos transitando a lo largo de un trecho de auto-pista. De esta forma, una serie de hipótesis simplificadoras fueron simuladas para su aplicación en áreas urbanas. El autor asumió, entre otras, la inexistencia de movimiento de giro para entrada y salida de los vehículos en la vía. Consideró, también, que la capacidad se mantenía constante a través del tiempo y de las condiciones diferenciadas presentadas por los diferentes trechos entre intersecciones.

El-Reedy y Ashworth (1978) condujeron una investigación para evaluar la potencialidad de la implantación de la actuación de los ómnibus en tiempos de semáforo previamente determinados por el modelo TRANSYT. Para los flujos observados, 17 ómnibus por hora, la medida presentó resultados favorables, invirtiéndose la situación para flujos supe-



riores a 30 ómnibus por hora.

Vicent et alii (1978) utilizó BUSPAS para estimar los beneficios a los ómnibus y los prejuicios a la circulación de los demás vehículos, al simular medidas prioritarias basadas en la detección de la presencia de los ómnibus en la corriente del tráfico superimpuestas a la operación convencional de los semáforos actuados en Inglaterra. Los flujos estudiados varían entre 20 y 80 ómnibus por hora. Los investigadores observaron que es posible alcanzar reducciones de los atrasos de los pasajeros en las intersecciones al asegurar la prioridad al tráfico de los ómnibus. Apesar de todo esto, beneficios generales difícilmente serían alcanzados caso fuesen llevado en consideración los altos costos del tiempo de los ocupantes de los vehículos privados.

Yedlin y Lieberman (1980) modificaron el modelo NETSIM para comparar el desempeño del sistema de ómnibus a lo largo de semáforos de vías arteriales operando con y sin equipamiento especial para detección de los ómnibus. Las condiciones testadas correspondieron a flujos de la orden de 1/3 de la capacidad de las intersecciones. Dentro de las conclusiones, la constatación de que la detección es muy eficiente cuando la frecuencia de los ómnibus es inferior a uno por minuto.

Ludwick (1974) alteró el modelo UTCS 1 para estudiar la detección de los ómnibus de semáforos de avenidas en Washington. Para las condiciones verificadas, donde los volúmenes varían de 15 a 120 ómnibus por hora, los resultados indicaron que la técnica permitiría obtener beneficios al sistema de ómnibus.

Lieberman et alii (1978) utilizó SCOT para evaluar estrategias de control a lo largo de pistas de contraflujo introducidas en una malla viaria constituida por dos arterias urbanas. Las estrategias simuladas consistieron en progresiones semaforizadas generadas por SIGOP II y alteraciones en los tiempos de verde debido a la detección de los ómnibus. El estudio indicó que la reducción media en los atrasos de los pasajeros del transporte público suplantó el incremento del tiempo de los pasajeros de los automóviles.

Papacostas (1982) describió un modelo microscópico denominado BUS-MALL que fue validado a lo largo de la vía principal de Honolulu y posteriormente utilizado para evaluar los impactos de estrategias operacionales en la velocidad media y capacidad. El modelo simula una única pista de ómnibus donde el adelantamiento está limitado a las proximidades de los puntos de parada. La capacidad alcanzada varió de 83 a 215 ómnibus por hora. Los resultados mostraron ventajas en la adopción de paradas de embarque y desembarque ubicadas en puntos equidistantes entre sucesivos semáforos. Papacostas también observó que la operación del sistema fue substancialmente mejorada al aumentar de dos para tres el número de ómnibus simultáneamente atendidos en los puntos de parada.

May et alii (1977) formuló TRANSYT 6B a partir de TRANSYT 6 al acrescentar, entre otros, impactos energéticos y de contaminación ambiental. Las medidas investigadas incluyeron pistas a lo largo del flujo y contraflujo para una vía arterial americana con ocho kilómetros de extensión, durante el pico de la tarde. Los mayores beneficios, a corto plazo, fueron los obtenidos con la optimización de la progresión semaforizada. Las sugerencias para continuidad de los trabajos indicaron la necesidad de la validez del modelo con resultados de campo, además de un mayor refinamiento en el modelaje de los impactos.



Cottinet et alii (1978) desarrollaron pesquisas relacionadas a la detección de la presencia de los ómnibus junto a los semáforos en varias localidades francesas. El trabajo englobó observaciones de campo y evaluaciones teóricas conducidas a través de la utilización de un modelo denominado SITRA B. Los autores concluyeron que para demandas arriba de 40 ómnibus por hora, las ventajas para los vehículos de transporte público no compensaba la perturbación causada para los demás vehículos.

Turner y Giannopoulos (1974) utilizaron un modelo que da atrasos y distancias de filas a lo largo de una red al evaluar las alteraciones ocurridas en Oxford Street, Londres.

### 2.3. Ensayos de laboratorio

Dentro de los pocos ensayos conducidos en pistas experimentales de laboratorio se destacan los de la General Motors y el de Transport and Road Research Laboratory.

En 1963 y 1968, fueron realizadas experiencias en las pistas de la G.M., en Michigan, para determinar las características de pelotones de ómnibus al traficar por una pista exclusiva entre sucesivas paradas de embarque y desembarque de pasajeros. Las investigaciones incluyeron aspectos relativos al distanciamiento entre paradas, velocidad operacional, espacio mantenido entre los vehículos del pelotón tanto en las paradas como en el desplazamiento. Fueron elaborados curvas velocidad-flujo (Herman et alii, 1970), para pelotones con tamaño variando de 2 a 10 ómnibus. De las curvas resultaron flujos de hasta 1450 ómnibus por hora, transitando a velocidades de aproximadamente 60 km/h. Vuchic y Day (1975), al discutir la capacidad de pistas exclusivas para ómnibus, observaron que los resultados divulgados están mas allá de las posibilidades, ya que las condiciones testadas, caracterizadas por un flujo ininterrumpido de vehículos, no son compatibles con la realidad donde la capacidad es determinada por las rampas, paradas y terminales.

La experiencia de 1968 (Scheel et alii, 1969) indicó que capacidades entre 350 e 400 ómnibus por hora con velocidades medias de 20 a 24 km/h serian alcanzadas por pelotones de seis ómnibus transitando entre puntos de parada separados por una distancia de casi 500 m, adoptando 30 seg como el tiempo de permanencia de los ómnibus en las paradas para el embarque y desembarque de pasajeros. Durante los ensayos, no fueron simulados intersecciones en nivel controladas por semáforos.

En 1970 fue conducido un test (Coburn y Cooper, 1973) en la área central de la pista del TRRL con la finalidad de evaluar el efecto de la introducción de una pista para ómnibus junto al cordón en la aproximación principal de un cruzamiento controlado por semáforo. Los resultados demostraron que al alejarse de la intersección el final de la pista exclusiva, era posible aumentar el flujo de saturación. Por otro lado, este procedimiento causaba un aumento en el tiempo de recorrido de los ómnibus. Fue formulada una expresión para el distanciamiento mínimo,  $D_m$ , entre la intersección y el final de la pista visando garantizar que los ómnibus adelantasen el cruzamiento durante el periodo de verde que sucede a la llegada de los mismos,

$$D_m = f \cdot l \cdot g - \frac{n \cdot L \cdot (c - g)}{60}$$

donde  $f$  es el flujo de saturación (veic./pista/s),  $g$  es el tiempo de verde (s),  $c$  es el tiempo del ciclo (s)  $n$  es el flujo de ómnibus (vehículo/minuto),  $\ell$  y  $L$  son, respectivamente, el largo efectivo (m) de los autos y ómnibus.

#### 2.4. Medidas implementadas

La implantación de tratamiento prioritario para vehículos de transporte público no es una técnica reciente o revolucionaria pues, en 1914, Liverpool ya posuía una avenida dotada de una pista reservada para el uso exclusivo de tranvías. Cuando los ómnibus substituyeron los tranvías, y la competición por el espacio viario entre ómnibus, camiones y automóviles se tornó acérrima, diversas técnicas de ingeniería de tráfico fueron desenvueltas para aprimorar la circulación de los ómnibus.

El estado del arte de las implantaciones conducidas en el ámbito internacional se encuentra documentado en diversos estudios, entre los cuales se destaca los publicados por el Committee on the Challenges of Modern Society (1976) y Levinson et alli (1973). Dentro de las millares de medidas introducidas en los escenarios urbanos, solamente pocas fueron científicamente analizadas en lo que se refiere a los impactos causados por las mismas.

#### 3. Direccionamiento de la Investigación

La revisión bibliográfica indicó que la potencialidad de la implantación de pistas para ómnibus no estaba debidamente caracterizada. Esta conclusión es particularmente relevante para pistas exclusivas junto al cantero central de vías arteriales urbanas, la técnica indicada para atender demandas elevadas de ómnibus.

Apenas pocas experiencias fueron conducidas en pista de ensayos. Apesar del hecho de investigaciones de este genero posibilitasen alteraciones controladas en las condiciones del tráfico y en las configuraciones viarias testadas, los altos costos envueltos acaban por imponer una limitación práctica en la serie de experimentos que puede ser realizada de esta forma. Los resultados merecen una interpretación cuidadosa ya que ellos proporcionan tan apenas indicaciones de como las medidas prioritarias se comportarian en condiciones reales de implantación.

Las reglas generales y los criterios de aplicación generalizada indican que los volúmenes de ómnibus necesarios para justificar la implantación de pistas para esta clase de vehículos son relativamente bajos si comparados con los existentes a lo largo de las principales vías de las áreas metropolitanas de los países en desarrollo.

La mayor parte de los modelos utilizados en la evaluación de la potencialidad de la implantación de medidas prioritarias para ómnibus fue estructurada de acuerdo con los requisitos impuestos por las configuraciones viarias y operacionales específicas de una o otra situación investigada. Dentro de los pocos modelos efectivamente válidos, una parte aun menor fue utilizada en la simulación de mas de una configuración viaria de implantación.

En casi todos los modelos no existe la posibilidad de simular, bajo idénticas condiciones de detalle, el flujo de ómnibus y demas vehí-



culos de la corriente de tráfico. En muchas situaciones, el abordaje diferente para la simulación del desplazamiento de los vehículos junto a las intersecciones y a lo largo del trecho entre intersecciones imposibilita, por ejemplo, la investigación de los efectos decorrientes de la alteración en la localización de puntos de parada y de modificaciones en el número de ómnibus simultáneamente atendido en los mismos.

Cabe también recalcar que ningún de los modelos revisados permite la conducción de una evaluación detallada de tráfico de todos los vehículos que se desplazan en una vía arterial urbana donde se estudia la posibilidad de la implantación de una pista exclusiva junto al cantero central. De esta forma, se desarrolló un modelo denominado de SIBULA (Simulation of Bus Lanes) para investigar los impactos en el tráfico debidos a la implantación de pistas exclusivas junto al cantero central, la técnica recomendada por algunas reglas existentes (Vuhic, 1981; Levinson et alii, 1975) para avenidas que presentan un elevado flujo de ómnibus y pasajeros.

#### 4. Aplicación de SIBULA

SIBULA (Lindau, 1983) es un modelo del tipo microscópico que permite la representación detallada de la operación de todos los vehículos que se desplazan a lo largo de un trecho de una vía arterial urbana. Las etapas de desenvolvimiento del modelo, su potencialidad de utilización y el ecuacionamiento cinemático formulado para simular el desplazamiento de los vehículos con respectiva validez, se encuentran descritos en trabajos presentados anteriormente (Lindau, 1984). En este trabajo, se discute la adopción de algunas configuraciones operacionales.

Pistas exclusivas junto al cantero central fueron introducidas a lo largo de avenidas radiales de ciudades brasileñas, tales como: Porto Alegre, Curitiba, Goiania (CET/EBTU, 1982). En Porto Alegre, se utilizó el sistema de convoy ordenado de ómnibus en las pistas de las Avenidas Farrapos e Assis Brasil. Este sistema opera en São Paulo, en condiciones de tráfico mixto, desde 1977 (Szasz et alii, 1978).

A título de ejemplo, se describe los principios de operación de los sistemas de convoyes ordenados ya implantados. Los ómnibus de las diferentes empresas son divididos en tres grupos: A, B, C. En una estación ordenadora, situada en el inicio de la avenida, los ómnibus forman filas de acuerdo con sus respectivos grupos. El semáforo de partida, operando normalmente, solo es accionado en la medida en que el pelotón está completo. Los pelotones de seis ómnibus operan con la siguiente conformación: AABBC. En los puntos de parada los ómnibus ocupan los locales designados para su grupo. Esta medida facilita el posicionamiento de los pasajeros que embarcan, posibilitando la entrada prácticamente simultánea de los mismos y contribuyendo, de esta forma, para la reducción de los tiempos de permanencia de los ómnibus en las paradas.

La Figura 1 presenta tres de las diferentes configuraciones operacionales testadas por SIBULA. El trecho de vía simulado es característico de las vías radiales urbanas de Porto Alegre.

En la configuración A, todos los vehículos operan en condiciones de tráfico mixto, estando la circulación de los ómnibus restringida a dos pistas de la vía principal: la pista localizada junto al cordón y la pista (mediana) utilizada para adelantamiento de ómnibus lento y de óm-



nibus parados en las estaciones. Los puntos de parada para embarque y desembarque de los pasajeros se localizan en medio de las cuadras. La forma operacional de los puntos de parada limita a tres los ómnibus que pueden ser simultáneamente atendidos.

En la configuración B, los ómnibus son confinados al uso exclusivo de la pista junto al cantero central de la vía. Los ómnibus se desplazan en convoyes ordenados. El programa es ejecutado para convoyes de tamaño variado. Son utilizados convoyes de 3 a 7 ómnibus, introducidos en el sistema a intervalos de 1 o 2 ciclos de los semáforos. En los puntos de parada, el número de lugares disponibles es siempre igual al tamaño del convoy utilizado. Cada ómnibus del convoy es ubicado en el respectivo lugar del punto de parada. Los puntos de parada fueron mantenidos en el medio de la cuadra. Ante la necesidad de los pasajeros atravesaren la vía, fueron introducidos semáforos peatonales. Estos semáforos funcionan solamente sobre los vehículos que transitan en las pistas laterales, no interfiriendo con el flujo de los ómnibus de la pista exclusiva.

En la configuración C, se mantiene la pista exclusiva para ómnibus introducida en la configuración B. Se altera solamente la forma de operación de los ómnibus. Los convoyes no son mas inicialmente ordenados, esto es, los ómnibus son colocados en el sistema sin los atrasos de la estación ordenadora. Entretanto, de la misma forma que en la configuración B, un determinado ómnibus solo puede efectuar el embarque e desembarque de pasajeros cuando esté parado en su respectivo lugar.

Las Figuras 2 y 3 presentan los resultados de las ejecuciones de los programas. El procedimiento adoptado consistió en aumentar progresivamente el volumen de entrada de los vehículos hasta que la saturación del sistema fuese alcanzada; esto es, hasta que las filas del trecho de estabilización no permitan la entrada de nuevos vehículos. Cada punto representa los tiempos medios de recorrido de los vehículos calculados a intervalos sucesivos de 15 minutos. Las curvas representan la forma general de la relación tiempo de recorrido-flujo de tráfico y estan interrumpidas en las regiones donde son alcanzados los flujos máximos de salida inherentes a las condiciones geométricas y operacionales de las configuraciones testadas.

La Figura 2 demuestra que la operación del ómnibus en convoyes ordenados de la configuración B permite que sea alcanzado una capacidad horaria bien mas elevada que la obtenida en las configuraciones A y C. Se nota, también, que la utilización de la configuración C para convoyes de 3 ómnibus, representada por la curva superior izquierda de la Figura 2, presenta una capacidad bien inferior a la obtenida a través de la configuración A.

Esa diferencia de capacidad es basicamente debida a las alteraciones ocurridas en la operación de los puntos de parada. En la configuración C cada ómnibus solo puede proceder al embarque y desembarque en su respectivo lugar. Ya en la configuración A el mismo ómnibus puede cargar y descargar pasajeros en cualquier lugar vacio.

En la Figura 3 se observa que la introducción de semáforos para peatones en el medio de las cuadras interfiere en los tiempos medios de recorrido de los automóviles. Solo en condiciones de operación dictadas por flujos horarios mas elevados es posible verificar que los beneficios provenientes de la separación fisica del tráfico de los ómnibus



y automóviles suplanta los efectos causados por la mayor incidencia de semáforos en la vía.

## 5. Conclusiones

Los criterios para la implantación de pistas para ómnibus en vías urbanas se limitan, básicamente, a las condiciones operacionales que existen en los países en vías de desarrollo, donde las demandas elevadas de pasajeros son atendidas por modalidades que ofrecen capacidades acima de las alcanzadas por la operación convencional del sistema de ómnibus. En el Brasil, así como en otros países en vías de desarrollo, la realidad es otra. Las altas inversiones requeridas para la implantación de sistemas del tipo subterráneo y tren suburbano tienen direccionado los esfuerzos de los técnicos de la área de transportes urbanos para la búsqueda de soluciones que posibiliten incrementar la capacidad del sistema ómnibus.

Dentro de las pistas para ómnibus, la pista exclusiva implantada junto al canteiro central es la recomendada para vías que presentan un alto flujo de ómnibus. Como ese tipo de pista se incluye entre las medidas mas dispendiosas para priorizar el flujo de ómnibus, es preciso evaluar, cuidadosamente, sus ventajas, desventajas y limitaciones. Vi-sando explorar la potencialidad de aplicación de esta técnica, aliada a la operación de ómnibus en convoyes ordenados, se desenvolvió un modelo, SIBULA, que permite simular, en detalle, el desempeño de los vehículos que transitan en vías arteriales dotadas o no de pistas exclusivas junto al cantero central.

En este trabajo, se describe un ejemplo de aplicación. Entre las principales conclusiones obtenidas para el caso analizado se destacan:

- 1) la simple introducción de una pista exclusiva junto al cantero central no resulta en el aumento de la capacidad ofertada por el sistema de ómnibus;
- 2) la operación de los ómnibus en convoyes ordenados en la pista exclusiva permite aumentos significativos de la capacidad ofertada;
- 3) la necesidad de la introducción de semáforos para peatones reduce parte de los beneficios obtenidos con la separación física entre automóviles y ómnibus.

## 6. Referencias

- ALLEN, B.L. (1973) Bus priority measures in London. Department of the Environment Symposium on Bus Priority, Transport and Road Research Laboratory, 1972, Crowthorne.
- BANCO MUNDIAL (1985) El ómnibus: factor clave del transporte urbano. Horizontes Urbanos, vol.9, nº 5, 1-3, 6.
- BLY, P.H. (1973) Use of computer simulation to examine the working of a bus lane. TRRL Report nº LR 609, Department of the Environment, Crowthorne.
- BLY, P.H. y WEBSTER, F.V. (1977) Contra-flow bus lanes: economic justification using a theoretical model. TRRL Report nº LR 918, Department of the Environment, Crowthorne.
- BOWES, R.W. y VAN DER MARK, J. (1977) Simulation of bus lane operations in downtown areas. Transportation Research Record 644, 41-44.
- CET/EBTU (1982) Tratamento preferencial ao transporte coletivo por ônibus. Convênio EBTU 054/80, Empresa Brasileira dos Transportes Urbanos, Brasília.
- COBURN, T.M. y COOPER, B.R. (1973) TRRL bus priority experiment on test track. Department of the Environment Symposium on Bus Priority, Transport and Road Research Laboratory, 1972, Crowthorne.
- COMMITTEE ON THE CHALLENGES OF MODERN SOCIETY (1976) Bus priority systems. NATO/CCMS Report nº 45, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne.
- COMMITTEE 3-D OF THE INSTITUTE OF TRAFFIC ENGINEERS (1959) Reserved transit lanes. Traffic Engineering, nº 7, 37-40.
- COTTINET, M., DE LA BRETEQUE, L.A., HENRY, J.J. y GABARD, F. (1979) Assessment by observation and simulation studies of the interest of different methods of bus preemption at traffic lights. International Symposium on Traffic Control Systems, University of California, 1979, Berkeley.
- DELGOFFE, L. (1972) Guidelines for improving the transit of street-level public transport in towns. UITP Revue, nº 3, 155-160.
- EL-REEDY, T.Y. y ASHWORTH, R. (1978) The effect of bus detection on the performance of a traffic signal controlled intersection. Transportation Research, vol. 12, 337-342.
- ERIKSEN, A.R. (1973) A central area transit simulation model. Urban Mass Transportation Administration, US Department of Transportation, Washington D.C.



GAHAN, E. (1973) A bus lane on a major artery in Dublin. Department of the Environment Symposium on Bus Priority, Transport and Road Research Laboratory, 1972, Crowthorne.

HERMAN, R., LAM, T. y ROTHERY, R. (1970) Experiment on bus platoon dynamics: an investigation of the flow characteristics of bus rapid transyt operations. Transportation Research Publication GMR 1052, General Motors Corporation. Warren.

LIEBERMAN, E.B., MUZYKA, A. y SCHMEIDER, D. (1978) Bus priority signal control: simulation analysis of two strategies. Transportation Research Record 663, 26-28.

LINDAU, L.A. (1983) High-flow Bus Operation on Urban Arterial Roads. Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Southampton, Inglaterra.

LINDAU, L.A. (1984) Um modelo microscópico de tráfego urbano. III Congresso Panamericano de Engenharia de Tráfego e de Transportes y Encontro Latino-Americano de Transportes Públicos, Associação Nacional de Transportes Públicos, 18-21 setembro 1984, São Paulo e Rio de Janeiro.

LINDAU, L.A. (1984b) Cinemática do fluxo interrompido de tráfego: uma abordagem microscópica. V Congresso Latino-Americano de Métodos Computacionais para Engenharia, FAPEX, 30 outubro a 1 novembro 1984, Salvador, Bahia.

LINDAU, L.A. (1984c) Desenvolvimento de um modelo microscópico para a simulação de tráfego urbano. Sociedade Brasileira de Pesquisa Operacional - II Encontro de Pesquisa Operacional no Rio Grande do Sul, Universidade Federal de Santa Maria, 14-15 setembro 1984, Santa Maria, RS.

LEVINSON, H.S., HOEY, W.F., SANDERS, D.B. y WYNN, F.H. (1973) Bus use of highways: state of the art. National Cooperative Highway Research Report nº 143, Transportation Research Board, Washington D.C.

LEVINSON, H.S., ADAMS, C.L. y HOEY W.F. (1975) Bus use of highways: planning and design guidelines. National Cooperative Highway Research Report nº 155, Transportation Research Board, Washington D.C.

LUDWICK, J.S. (1974) Simulation of an inconditional preemption bus priority system. Report nº MTP-400, Mitre Corporation, Washington D.C.

MAY, A.D., KRUGER, A.J. y CLAUSEN, T.J. (1977) Development and application of traffic-management models. Transportation Research Record 630, 1-6.

MUZYKA, A. (1975) Bus priority strategies and traffic simulation. Transportation Research Board Special Report 153, 39-49.

- OLDFIELD, R.H., BLY, P.H. y WEBSTER, F.V. (1977) With-flow bus lanes: economic justification using a theoretical model. TRRL Report Nº LR 809, Department of the Environment, Crowthorne.
- PAPACOSTAS, C.S. (1982) Capacity characteristics of downtown bus streets. Transportation Quarterly, vol. 36, nº 4, 617-630.
- RADELAT, G. (1973) Simulation of bus operation on signalized arterials. Federal Highway Administration FHWA-RD-74-6, Traffic Systems Division, Washington D.C.
- RICHARDSON, A.J. y MCKENZIE, H.P. (1976) Current techniques for planning, evaluating and implementing priority lanes. Commonwealth Bureau of Roads, Australia.
- RITCHIE, S.G. (1978) Arterial bus lane warrants. VIII Australian Road Research Board Conference, vol. 8, nº 4, 63-67.
- SALTER, R.J. y MEMON, A.A. (1977) Simulation of a bus-priority lane. Transportation Research Record 626, 29-32.
- SALTER, R.J. y SHAHI, J. (1979) The prediction of the effects of bus-priority schemes by using computer simulation techniques. Transportation Research Record 718, 1-5.
- SCHEEL, J.W. y FOOTE, J.E. (1969) Comparison of experimental results with estimated single lane bus flow through a series of stations along a private busway. Transportation Research Publication GMR 888, General Motors Corporation. Warren.
- SZASZ, P.A., MONTANS, L.C. y FERREIRA, E.D. (1978) COMONOR: Comboio de ônibus ordenados. Boletim Técnico nº 9, Companhia de Engenharia de Tráfego, São Paulo.
- TURNER, E.D. y GIANNOPOULOS, G.A. (1974) Pedestrian station: London's Oxford Street experiment. Transportation, vol.3, nº 2, 95-125.
- VINCENT, R.A., COOPER, B.R. y WOOD, K. (1978) Bus-actuated signal control at isolated intersections - simulation studies of bus priorities. TRRL Report nº LR-814, Department of the Environment, Crowthorne.
- VUCHIC, V.R. (1981) Urban Public Transportation: Systems and Technology. Prentice-Hall, Englewood Cliffs.
- VUCHIC, V.R. y DAY, F.B. (1975) Discussion of the paper: Bus capacity analysis. Transportation Research Record 546, 41-43.
- YEDLIN, M. y LIEBERMAN, E.B. (1980) Analytic and simulation studies of factors that influence bus-signal-priority strategies. Transportation Research Record 798, 26-29.



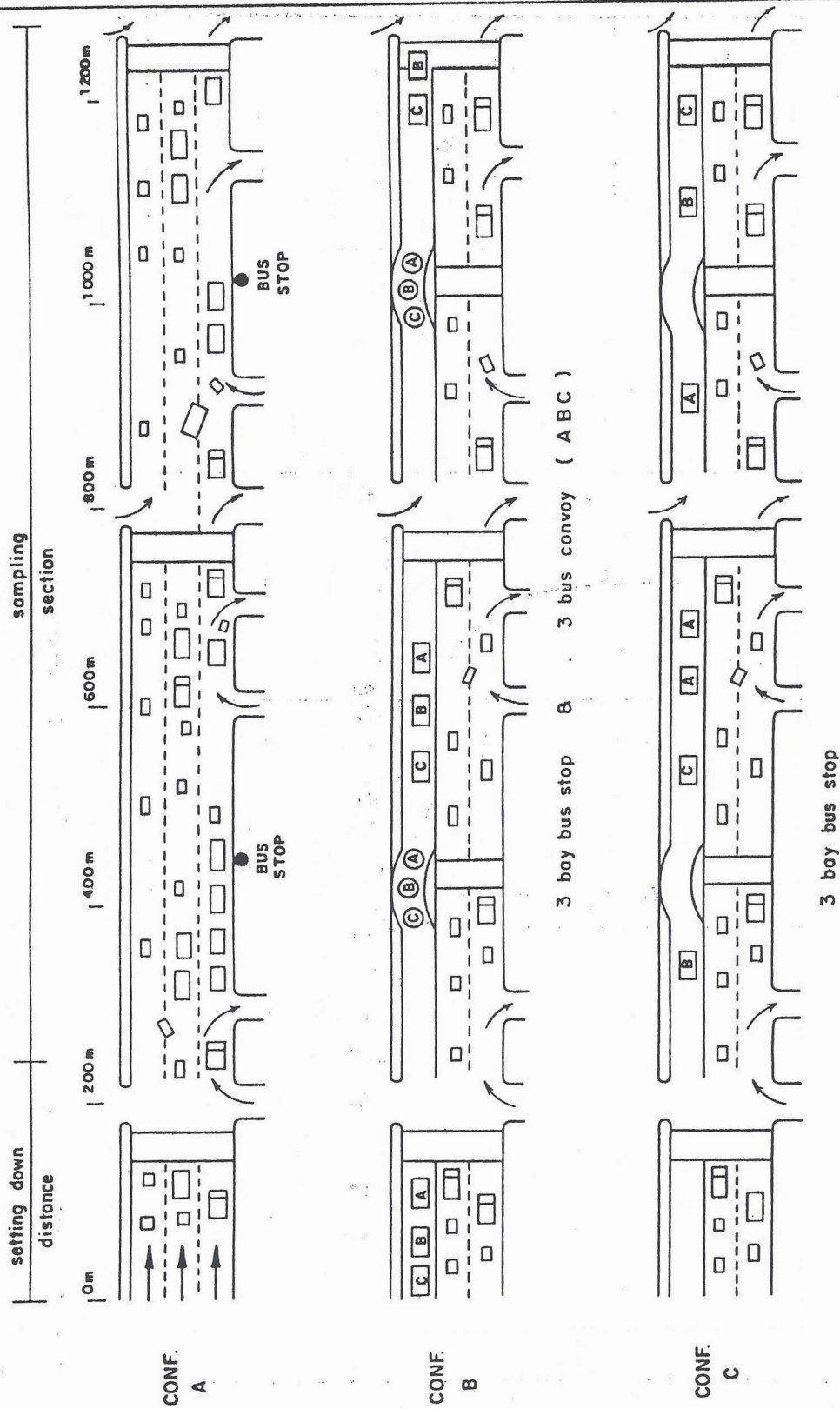
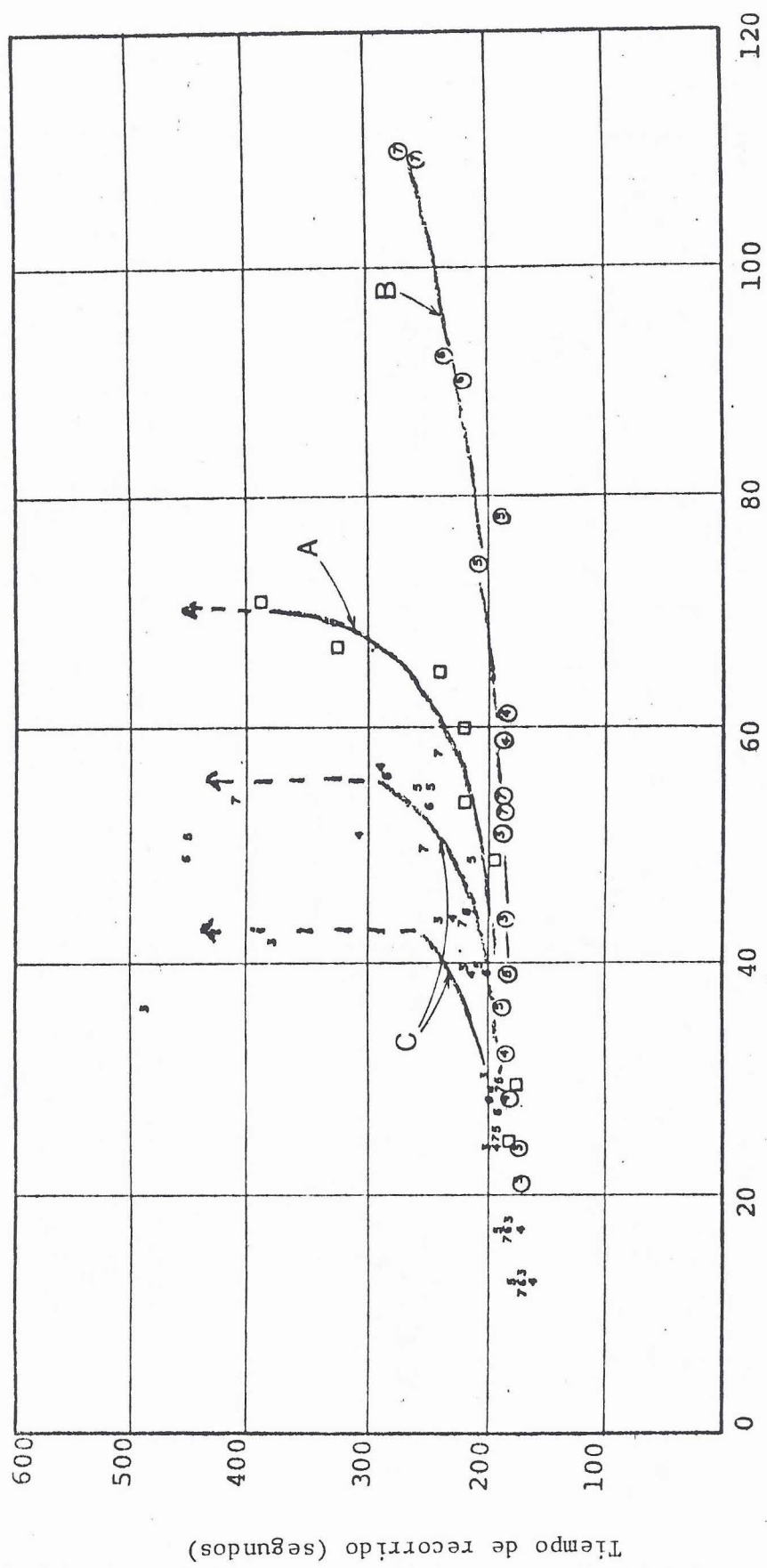


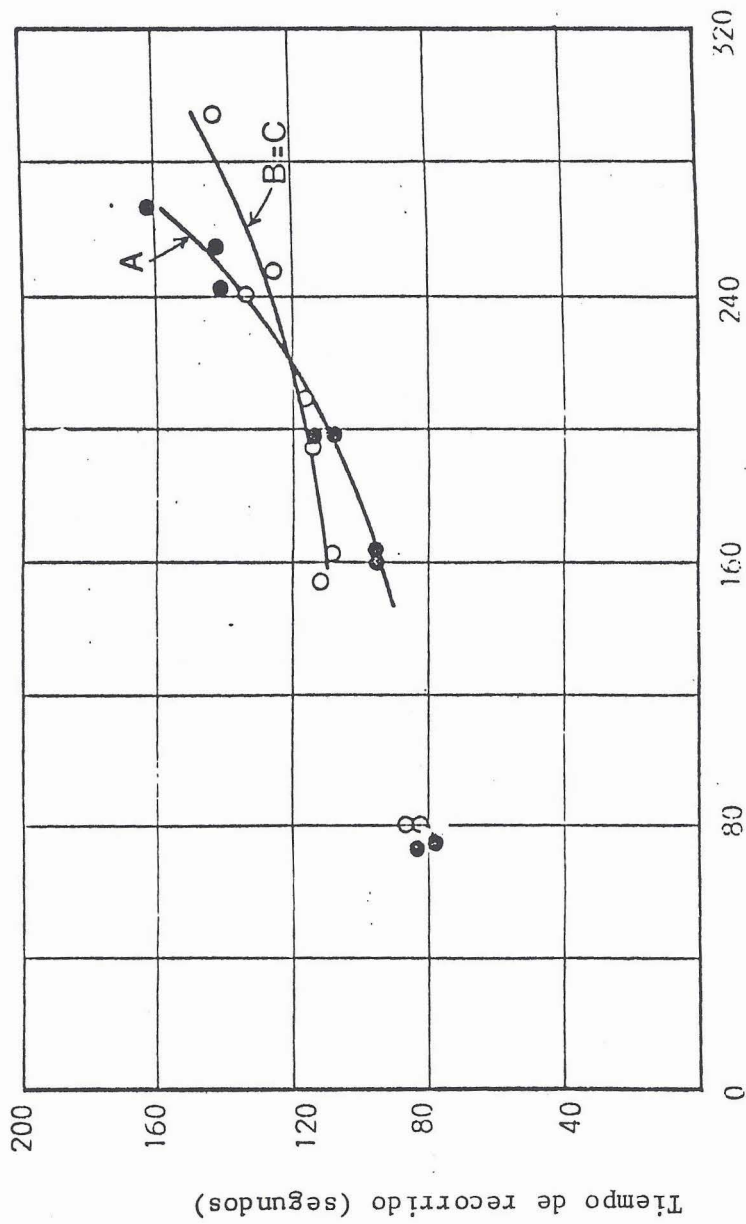
FIGURA 1: Configuraciones operacionales y geometría del trecho simulado



Flujo de ómnibus dejando el sistema (vehículos/15 minutos)

FIGURA 2: Resultados - ómnibus





Flujo de automóviles dejando el sistema (vehículo/15 minutos)

FIGURA 3 : Resultados - automóviles