Simulación del transporte colectivo urbano

Héctor Cancela Bosi *María E. Urquhart*
cancela@fing.edu.uy urquhart@fing.edu.uy
Tel: (+598-2)7114244 Fax: (+598-2)7110469
Investigación Operativa - InCo - Pedeciba Informática
Facultad de Ingeniería, Universidad de la República
Montevideo, Uruguay

Reporte Técnico INCO 99.04

Mayo 1999

Resumen

La organización eficiente del transporte colectivo de pasajeros es un aspecto fundamental para el correcto funcionamiento de las agrupaciones urbanas modernas. Para esto, las autoridades locales, las empresas de transporte, y otras entidades implicadas, deben contar con herramientas que permitan analizar la realidad y comparar distintas alternativas de acción posibles. Este trabajo presenta un convenio actualmente en curso entre la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República (UDELAR - Uruguay) y la Intendencia Municipal de Montevideo, cuyo objetivo es el planteo de un modelo del transporte colectivo urbano y el desarrollo de un prototipo que simule un conjunto de líneas de ómnibus, y provea de información sobre el comportamiento del sistema. En el estado actual del proyecto, se ha completado el modelado del problema y el desarrollo del prototipo de simulador, incluyendo salida visual interactiva y recolección automática de datos. Las actividades en curso comprenden el desarrollo de los casos de pruebas y la validación.

Palabras clave: *transporte colectivo urbano, simulación a eventos discretos.*
Categoría y área: *Proyecto de desarrollo; simulación, transporte público.*

1 Introducción

En todas las agrupaciones urbanas modernas, el transporte colectivo de pasajeros es uno de los puntos clave para facilitar el desplazamiento de los usuarios sin causar daños a los valores de la comunidad, persiguiendo además un uso más eficiente de las infraestructuras existentes así como de los recursos económicos insumidos en el mismo. Sin embargo, las tendencias actuales del mercado tienden a una mayor disponibilidad de medios de locomoción individual, particularmente el automóvil, con el consiguiente decremento del nivel de uso de los sistemas de transporte colectivo, y todos los problemas que esto conlleva [1, 3, 7].

La ciudad de Montevideo no escapa a esta realidad; siendo una de las preocupaciones de la Intendencia Municipal de Montevideo (IMM) el desarrollo de políticas de transporte y la implementación de medidas concretas para manejar esta situación. Uno de los aspectos imprescindibles para poder tomar medidas de forma racional es la posibilidad de evaluar los resultados de las mismas previamente a su aplicación. Para esto es necesario contar con herramientas computacionales adecuadas.

En el marco del Proyecto de Cooperación entre la Comunidad Europea y la Intendencia Municipal de Montevideo para la Promoción y el Mejoramiento de la Calidad de la Oferta de Servicios vinculados a las Infraestructuras Públicas en Montevideo y el Area Metropolitana (Proyecto URY/BY-3011/95/010 [5]), se viene llevando a cabo un convenio entre la Facultad de Ingeniería, Universidad de la República (Uruguay) y la Intendencia Municipal de Montevideo, cuyo objetivo es el planteo de un modelo del transporte colectivo urbano y el desarrollo de un prototipo que simule un conjunto de líneas de ómnibus (en una zona de Montevideo en una primer etapa), y permita evaluar la demanda insatisfecha, carga de cada línea y otros parámetros de interés.

En esta presentación hacemos un breve resumen del trabajo realizado en este proyecto, que todavía no ha finalizado. En la sección 2 damos una breve descripción del problema planteado; en la sección 3 describimos las etapas del proyecto, incluyendo el modelado, el desarrollo del prototipo de simulador, los casos de pruebas y validación; y por último en la sección 4 presentamos las conclusiones.

2 Descripción del problema

La ciudad de Montevideo cuenta con alrededor de 1:500.000 habitantes en su zona urbana, que efectúan alrededor de 1:900.000 viajes diarios [4]. Estos viajes se realizan principalmente en ómnibus y en automóvil; siendo de menor importancia el empleo de taxis, bicicletas y ciclomotores.

El sistema de transporte público de Montevideo está basado en el uso de ómnibus, y consta de múltiples líneas, cuya explotación es realizada por un conjunto de empresas privadas y cooperativas (en base a concesiones otorgadas por la IMM). Cada una de las líneas realiza recorridos distintos a las demás, aunque generalmente tiene tramos en común con varias de ellas.

El transporte público sufre una serie de problemas: disminución del número de pasajeros, disminución de la rentabilidad, cambios de densidad de población en distintas zonas urbanas y sub-urbanas. Estos problemas se agravan por un diseño de recorridos de las líneas de ómnibus que no se adecúa a la realidad actual, y que resulta difícil de modificar por el sistema de concesión de las mismas.

Dentro de la gestión y mejora de la movilidad de bienes y personas en la ciudad de Montevideo, el tema del transporte público es uno de los puntos clave. Se desea mejorar la calidad de los transportes colectivos, para:

- evitar problemas de congestión
- aumentar la eficiencia del sistema
- evitar la continua caida de la rentabilidad del sistema de transporte público, que pone en cuestionamiento su viabilidad futura.

Para esto, la IMM desea contar con herramientas para

- evaluar tiempos de espera de pasajeros, tiempos de viaje
- evaluar los parámetros de carga de las distintas líneas
- evaluar efectos de modificaciones en trazado de líneas y frecuencias.

Dada la complejidad del problema y la dificultad de elaborar modelos analíticos adecuados [8, 9, 10], los modelos de simulación computacionales aparecen como una alternativa interesante. La simulación del transporte como método consiste en la construcción de un modelo de la realidad, en este caso computacional, que reproduzca el comportamiento de los vehículos. Esto se realiza a partir de determinadas características de estructura y gestión de una red de calles de una ciudad. La simulación permite probar soluciones alternativas en el "laboratorio", posibilitando su mejoramiento con un bajo costo, disminuyendo el riesgo de un fracaso en la etapa de implementación.

3 Descripción del proyecto

El proyecto se estructura en torno a las siguientes etapas: 1) modelado; 2) diseño e implementación del prototipo; 3) desarrollo de un juego de datos representativo; 4) validación. Las dos primeras etapas han sido finalizadas, mientras que las dos últimas se encuentran todavía en ejecución.

3.1 Modelado

En esta etapa se realizó un relevamiento de los principales elementos del sistema a tener en cuenta, y se especificó utilizando notación UML complementada con notación textual sus interrelaciones y comportamiento dinámico. Por obvias limitaciones de espacio, solo incluiremos aquí una breve descripción textual de los principales componentes del sistema, así como los indicadores que se consideran importantes a efectos de evaluar el funcionamiento del mismo.

- Pasajeros: son los usuarios del sistema. Sus necesidades consisten en trasladarse de un punto a otro de la ciudad, en determinados horarios del día; para esto, utilizan las líneas de ómnibus disponibles (no consideraremos los otros modos de transporte: a pie, en taxis, o en vehículos propios). Para conformar la descripción del comportamiento de los pasajeros, tendremos en cuenta:
  - Demandas de traslado de un punto a otro de la ciudad ("matriz origen-destino").
  - Elección entre alternativas para efectuar el traslado (dentro del modo ómnibus; es decir, elección entre dos líneas, o posibilidad de hacer una conexión intra-modal).

  La satisfacción de los pasajeros es uno de los objetivos importantes dentro del diseño del sistema de transporte; por lo tanto, los siguientes indicadores son relevantes:
  - Tiempo de espera, tiempo de viaje, tiempo total de traslado.
  - Proporción de pasajeros que viajan parados.
  - Proporción de pasajeros que viajan en condiciones de saturación.
- Red de transporte: es el grafo que representa la red vial utilizada por los servicios de transporte, a un nivel de detalle adecuado. Está compuesta por:
  - Nodos: representan ubicaciones geográficas. Poseen una posición, y en caso de corresponder a puntos de acceso de pasajeros, están ligados a la matriz origen-destino.
  - Arcos: representan los tramos que unen los nodos entre sí. A cada arco se asocia la distancia entre sus nodos extremos; así como otras características de la red vial (velocidad media y máxima, estado del pavimento, etc.).
- Líneas de ómnibus: cada línea de ómnibus corresponde a uno de los recorridos habitualmente efectuados por una empresa (y determinados a priori por la IMM). Una línea está determinada por la información siguiente:
  - Terminales de la línea
  - Recorrido de la línea (en términos de nodos y arcos de la red de transporte vial).

  - Paradas de la línea (nodos de la red donde pueden ascender y descender pasajeros).
  - Velocidades de viaje (altamente relacionado con las características de la red de transporte).
  - Empresa que efectúa el recorrido (y número identificatorio del mismo).

  Otro objetivo fundamental dentro del diseño del sistema de transporte es la eficiencia y buen uso de los recursos empleados, en particular los buses; por lo tanto, los siguientes indicadores son relevantes:

  - Número total de pasajeros transportados.
  - Índices de carga de los ómnibus.

- Unidades de ómnibus: cada ómnibus pertenece a una empresa, y posee ciertas características importantes como su capacidad, el número de puertas, el hecho de contar o no con guarda.

- Despacho de ómnibus: consiste en asignar las unidades de ómnibus de las empresas a las líneas conjuntamente con un horario para realizar el recorrido (a esto lo llamaremos un viaje). Normalmente, esta información se conoce con el nombre de "minutas", que realizan una planificación previa de todo un día de trabajo. En la práctica, es muchas veces necesario modificar sobre la marcha esta planificación, debido a diversos incidentes (rotura de ómnibus, demoras excesivas, etc.).

3.2 Prototipo implementado

Como mencionamos en la subsección precedente, la primer etapa incluyó el desarrollo de un modelo detallado utilizando como herramienta UML. La implementación del prototipo se realizó utilizando el lenguaje MODSIM [2]. Se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos:

- Modelo: por las características del sistema, se implementó un modelo de eventos discretos, utilizando las primitivas que provee MODSIM.

- Entrada de datos y parámetros: teniendo en cuenta los objetivos de portabilidad y de rapidez de implementación, se definió un formato en archivos de texto para la descripción de la instancia concreta del problema (red vial, líneas de buses, horarios de despacho, demandas de pasajeros). Esto implica que previo al uso del simulador, es necesario crear estos archivos a partir de las fuentes de datos disponibles.

- Salida visual: este punto resulta muy importante para la validación del prototipo, así como para permitir que el usuario pueda lograr una mayor intuición del funcionamiento del sistema real, y también detectar posibles problemas en el mismo. Se incluyó salida visual tanto interactiva como simplemente de visualización. Como puede apreciarse en la figura 1, se muestra un mapa esquemático de las líneas de buses, las paradas respectivas con aspecto proporcional a la cantidad de pasajeros en las mismas, la posición de cada bus, e histogramas mostrando la cantidad de buses en el sistema y la cantidad de pasajeros en el sistema. Además de mantener esos datos actualizados en forma simultánea con el avance de la simulación, es posible también también obtener información sobre paradas y buses de forma interactiva, con una pulsación del ratón.

- Recopilación de resultados: cada corrida de simulación genera automáticamente un archivo de texto con el detalle de los datos recolectados durante la misma. En particular, se recolectan datos desagregados por período horario para la cantidad de pasajeros que llegaron, viajaron y descendieron en las distintas esquinas y en los distintos buses, así como sus tiempos de espera, y los quilómetros recorridos, tiempo de viaje, tiempo de espera, y nivel de ocupación de los distintos buses.

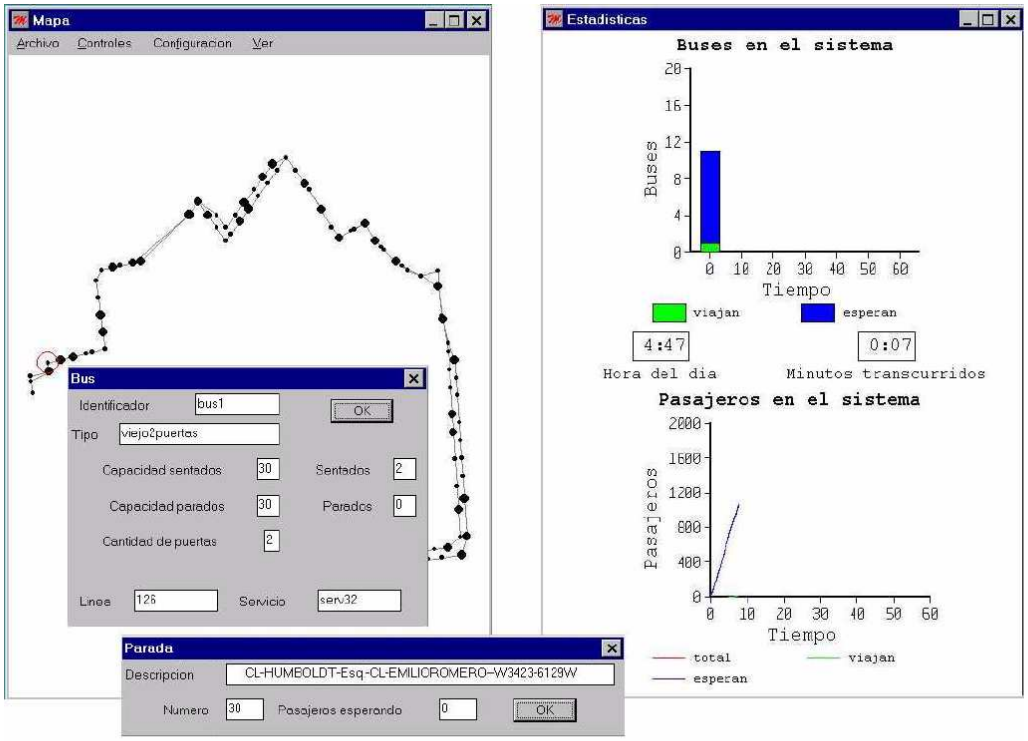

Figura 1: Interfaz gráfica simulador

3.3 Desarrollo juego de datos representativos y validación

A partir de la información proporcionada por la IMM y las empresas, se ha elaborado un juego de datos representativo de una línea determinada, comprendiendo el detalle del recorrido (extraído del Sistema de Información Geográfica de la IMM), los horarios de despacho actualmente vigentes (redigitados a partir de planillas en papel proporcionadas por las empresas), y una estimación de la demanda de pasajeros por hora del día (a partir de datos disponibles en una encuesta Origen-Destino realizada para la IMM en 1997 [6]). Esta línea sirve entre sus recorridos de ida y vuelta a 120 paradas. En la actualidad, se está elaborando un juego de datos representativo de la zona oeste de la ciudad, comprendiendo unas treinta líneas y más de 1300 paradas. El gran problema en este caso es el ingreso de información que no está disponible en forma electrónica (como por ejemplo los horarios de despacho de los buses); así como la conexión con los sistemas de información ya disponibles.

4 Conclusiones

Dado que el proyecto aún se encuentra en su fase de validación, es un poco prematuro evaluar el grado de alcance de los objetivos planteados. Sin embargo, podemos señalar algunos puntos interesantes:

- el desarrollo del modelo insumió una cantidad importante de horas-hombre para identificar las interrelaciones de los distintos componentes del sistema;
- este trabajo involucró proyectos de grado de varios estudiantes, contribuyendo a la formación de recursos humanos capacitados en la temática;

- una vez obtenido el modelo, la implementación en Modsim resultó relativamente sencilla. Las mayores dificultades aparecieron ligadas al uso de las herramientas de presentación visual incluídas en el paquete;
- el prototipo implementado permite obtener información detallada por línea y por cada viaje de bus, que es imposible de obtener por medio de modelos analíticos;
- la realimentación visual permite facilitar la tarea de depuración del modelo, y la interpretación de resultados;
- el mismo sistema puede ser usado con datos de nivel de agregación mayor, menos detallados.

Los principales problemas encontrados, que deberán ser resueltos para el uso efectivo de una herramienta de esta naturaleza, se dieron en la etapa de desarrollo del juego de datos. En particular, el hecho de disponer de los datos de horarios de despacho solamente en versión impresa, que obliga a su redigitación; el alto nivel de agregación de la encuesta Origen-Destino disponible, que obliga a realizar aproximaciones; y la escasa integración de los sistemas informáticos disponibles.

5 Agradecimientos

Deseamos agradecer a la Intendencia Municipal de Montevideo, y en particular al Dr. Patricio Rodé, al Arq. Pedro Mastrangelo, al Ing. Alberto Ortega, a la Ing. Beatriz Tabacco, al Ing. Máximo Oleaurre y al Ing. Enzo Rosa por su apoyo para la realización de este proyecto.

Referencias

[1] David Banister and Laurie Pickup. *Urban transport and planning: a bibliography with abstracts.* Mansell Publishing Co., 1989.

[2] CACI. Modsim home page. *http://www.caciasl.com/modsim.html.*

[3] Stuart Cole. *Applied transport economics.* Biddles Limited, Guilfod and King's Lynn, 1996.

[4] Fonadep/BID Préstamo 786/SF-UR Subpréstamo GD/24-2/88-46. Proyecto funcional de la red estructural de transporte de la ciudad de Montevideo: Informe final. Technical report, IMM, Mayo 1991.

[5] IMM. Proyecto de cooperación "Promoción y mejoramiento de la calidad de la oferta de servicios vinculados a las infraestructuras públicas en Montevideo y el área metropolitana": Avances de informe final. Technical report, Montevideo, Noviembre 1997.

[6] InterConsult. Estudio sobre utilización del transporte colectivo de pasajeros en la ciudad de Montevideo - segunda fase - informe final. Technical report, IMM - Dirección de Tránsito y Transporte, Enero 1997.

[7] Institute of Transportation Engineers. *A toolbox for alleviating traffic congestion and enhancing mobility.* ITE, 1997.

[8] N. Oppenheim. *Urban travel demand modelling.* John Wiley and Sons, 1995.

[9] J. de D. Ortúzar and L. G. Willumsen. *Modelling Transport.* John Wiley and Sons, 1994.

[10] Tom Rallis. *City Transport in developed and developing countries.* St. Martin's Press, 1988.