

INFORMATICA Y CONOCIMIENTO

SIMULACIÓN DE SISTEMAS DE TRANSPORTE PÚBLICO MASIVO

Luz Ángela Serrano¹, Jorge Eduardo Ortiz²

1-2. Profesores Departamento de Ingeniería de Sistemas e Industrial, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.

* Correspondencia a la Profesora Luz A. Serrano : laserranor@unal.edu.co.

Resumen

Se presenta un modelo de simulación para la evaluación del desempeño de un sistema de transporte público masivo (STPM). El prototipo resultante, es flexible, tanto en la construcción del “esqueleto” de un STPM a partir de un esquema base que proporciona los componentes a usar y las reglas para la ubicación y las relaciones de los mismos, como para el modelamiento de los eventos aleatorios característicos de este tipo de sistemas. El modelo final es una red de colas complementada con elementos adicionales como matrices origen/destino que permiten considerar fenómenos propios de un STPM. El prototipo permite definir y evaluar medidas de desempeño típicas de las líneas de espera, como por ejemplo, tiempos de permanencia promedio en el sistema y en cola, longitudes esperadas de las colas, etc. (Rev Fac Med Univ Nal Colomb 2004; 52: 75-82)

Palabras clave: simulación, sistemas de transporte público masivo, redes de colas abiertas, matriz origen/destino, desempeño.

Summary

In this paper, a simulation model for the performance evaluation of a Public Massive Transport System (STPM) is presented. The final prototype is flexible in both, the construction of a STPM’s “skeleton” from a base schema that gives the components to be used and the rules for the location and relationships between them, and for modeling random events characteristics of this type of systems. The final model is a Queueing Network with other elements such as Origin-Destination Matrices, which let to consider typical STPM’s phenomenon. The prototype allow to define and to evaluate typical performance measures for wait lines, for example, the mean time in the system and in queue, the expected length of the queues, and so forth. (Rev Fac Med Univ Nal Colomb 2004; 52: 75-82)

Keywords: simulation, public massive transport system, open queueing networks, origin-destiny matrices, performance.



Figura 1. Esquema general del STPM.

Introducción

El auge actual de la implantación de sistemas de transporte público masivo estructurados (como por ejemplo, el Metro en el caso de Medellín, y Transmilenio en el caso de Bogotá, y próximamente en Cali), que buscan, con un costo similar para el usuario, prestar un servicio de mejor calidad al que prestan los sistemas de transporte que por más de 50 años han predominado en nuestro país, evidencia la conveniencia del diseño y construcción de herramientas que permitan evaluar el desempeño de dichos sistemas. Sin embargo, se encuentran los siguientes inconvenientes:

1. La evaluación de los sistemas en cuestión, mediante métodos analíticos, se convierte en una tarea ardua y en algunos casos imposible, cuando la interacción de los fenómenos constitutivos aumenta.
2. La mayoría de los supuestos en los que se basan los modelos de colas para los cuales existen métodos de solución analítica, no representan bien la realidad.
3. Un STPM merece ser considerado como modelo de colas completo, y no mediante mo-

delos típicos (como por ejemplo el M/M/s), adecuados sólo para estudiar de forma individual sus componentes.

Aquí, surge la construcción de un modelo de simulación como una alternativa para superarlos.

Pero la importancia de la simulación no sólo radica en la necesidad de estimar medidas de desempeño no disponibles analíticamente, pero que sin embargo, son de interés vital. También es importante para resolver preguntas del tipo ¿Qué pasa si...?, sin la necesidad de hacer pruebas sobre el sistema real, las cuales podrían representar pérdidas si no se consiguen los resultados que se buscan, y además implican costos de espera mientras se adecuan los medios y circunstancias para su implantación. Así, claramente las herramientas de simulación, constituyen sistemas adecuados de apoyo a la toma de decisiones.

Esquema general del STPM

La figura 1 representa el esquema general sobre el cual opera el STPM a simular.

Los elementos más importantes de dicho esquema son. Estaciones intermedias, en donde se presentan procesos de arribo de usuarios, los cua-

les pueden tener ya un tiquete, o pasar a comprarlo en la taquilla antes de ingresar a la estación. Para entrar a la estación, los usuarios deben presentar su tiquete para poder cruzar un torniquete, y así pasar al interior a esperar el arribo de la ruta que los conduce a su estación destino. Allí los usuarios también pueden hacer transbordos, de ser necesario para llegar a su destino final.

Portales, los cuales son estaciones terminales, en donde además de presentarse los mismos eventos que se presentan en las estaciones normales, se despachan buses para de las rutas que le corresponden.

Rutas de buses, las cuales tienen un portal de origen y uno de destino, recorren las troncales en los dos sentidos y se detienen en estaciones específicas durante su trayecto. Para la prestación del servicio de rutas, se dispone de una flota de buses, y así mismo, son establecidas frecuencias de despacho para cada ruta, que suelen ser altas.

Troncales, sobre las cuales transitan los buses y están ubicadas las estaciones.

Flota de buses, de la cual se asignará cierto número para cubrir la demanda de cada ruta.

Modelos estocásticos y teoría de colas en el STPM

No es necesario un conocimiento profundo, tanto de los STPM, como de los procesos estocásticos, y en particular, su papel en la teoría de colas, para poder afirmar que en dichos sistemas se encuentran fenómenos que pueden ser representados mediante procesos estocásticos. Un ejemplo claro, es el arribo de clientes a un portal o una estación, que suelen ser modelados como un proceso de Poisson, que representa un caso especial de un proceso de renovación.

Por ejemplo si se considera de manera aislada el comportamiento de una taquilla cualquiera en una estación o en un portal, sería aplicable un modelo de cola $M/M/1$, en el que el cálculo analítico de los resultados bajo condiciones de estado estable, es relativamente trivial. Sin embargo, podría ser más preciso el empleo de un proceso de Poisson no homogéneo (no estacionario)(1), mediante el cual sea posible tener en cuenta el aumento en la tasa de llegada de los usuarios durante intervalos específicos (horas pico); así como también, el empleo de tasas de servicio μ_n dependientes del estado del sistema (numero de usuarios en espera por ser servidos), ya que, como es apenas natural, cuando la cola es demasiado larga, los servidores muestran una tendencia a trabajar más rápido, en busca de reducir la congestión, y por qué no, evitar la pérdida de usuarios que podrían desistir de entrar al sistema ante la gran congestión (2).

Así las cosas, e incluso considerando sólo las tasas de servicio dependientes del sistema, se encuentran obstáculos para aplicar los resultados de estado estable (ecuación de balance), ya que es muy probable encontrarse con sumatorias para las cuales no es posible hallar una expresión analítica (1). Para este caso en particular, la aplicación de un procedimiento de Simulación, podría conducir a una buena aproximación. Mediante los resultados obtenidos en la simulación, lo único que resta por hacer, es calcular los tiempos de espera en el sistema, número esperado de clientes en la cola, etc.; mediante el uso de sus estimadores (3).

Modelo para el STPM

Redes de colas abiertas en los STPM. Ya se evidenció la facilidad para evaluar el desempeño de uno solo de los componentes que están presentes en el STPM. Sin embargo el tratamiento de dichos componentes como colas simples aisladas no ofrece un modelo significativo para su estudio. En cambio, si son considerados en conjunto,

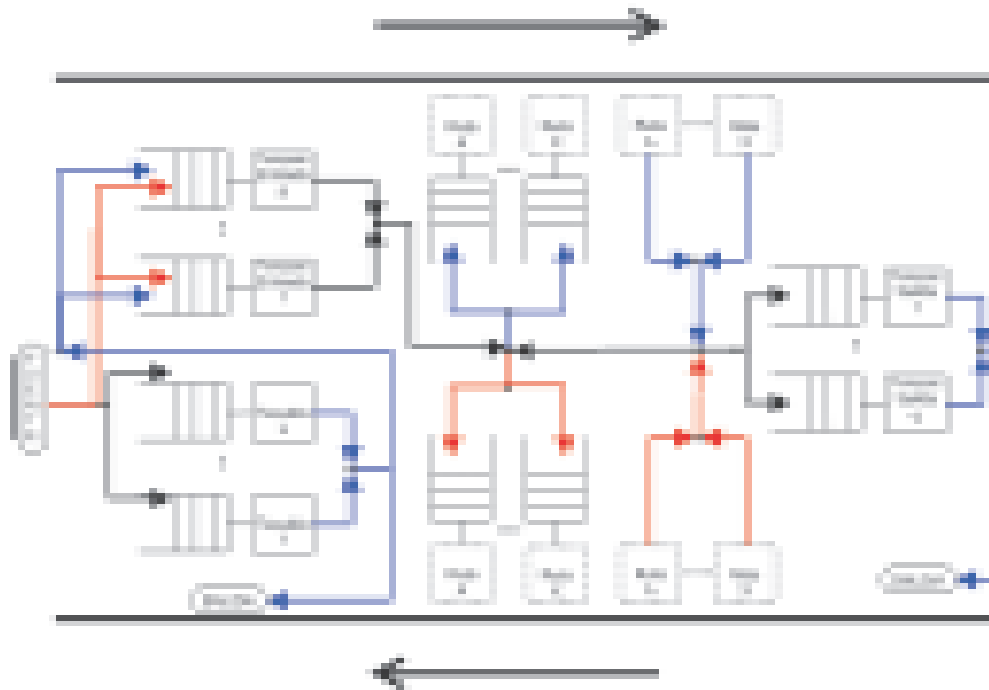


Figura 2. Una estación del STPM, representada como una Red de colas abierta

se podrá observar como su interacción se ajusta a otros modelos más interesantes, para los cuales, su evaluación mediante herramientas de simulación, brinda un aporte más apreciable.

Tal es el caso de las Redes de Jackson, las cuales constituyen sistemas de colas finitas en serie, en donde los usuarios pueden visitar o no todas las colas en un orden no necesariamente igual (4). Por ejemplo, se podría pensar en una red de este tipo para representar el sistema de colas formado en una estación entre la taquilla y entre los torniquetes, ya que puede suceder, que el usuario ya haya comprado el tiquete, por lo que no tendría que pasar primero a la taquilla, sino que pasaría directamente a los torniquete (en donde como es apenas natural, se presentan fenómenos de espera que pueden ser estudiados con un modelo M/M/s).

Pero el modelo puede ser aún más interesante si es considerado como una red de colas abier-

tas, en donde se liberan las suposiciones de modelos de redes de colas típicas es como el de Jackson, y se hace posible el empleo de distribuciones de probabilidad más adecuadas, tanto teóricas como empíricas.

Como se puede observar en la figura 2, la red de colas cuenta con múltiples fuentes, ya que, para cada estación, los eventos de arribo de pasajeros constituyen eventos aleatorios que pueden comportarse de acuerdo a distribuciones distintas, o por lo menos con distintos parámetros. También podría hablarse de múltiples destinos; sin embargo, lo que representan éstos en últimas, son los distintos momentos en los que se puede producir una salida del sistema.

Así, cuando un usuario llega a una estación (intermedia o terminal), pueden darse alguna de estas situaciones: si el usuario ya tiene un tiquete, seleccionará inmediatamente un torniquete para ingresar a la estación (típicamente será en el

que halla una menor cola). Entrará a la cola de la taquilla (pueden haber varias taquillas) para, luego de ser servido allí y obtener su tiquete, pasar a los torniquetes para ingresar a la estación. Entrará a la cola de la taquilla y luego de ser atendido y obtener su tiquete, abandonará el sistema, pues su único fin puede ser comprar uno o varios tiquetes para viajes posteriores.

En todo caso, si el usuario finalmente entra a la estación a esperar el arribo de un bus de alguna ruta que lo conduzca a su destino, primero se debe tener en cuenta los elementos del modelo expuestos en las secciones siguientes, los cuales se refieren a la selección de la ruta y posibles transbordos a realizar; lo que añade una situación a las mencionadas arriba, ya que pueden arribar usuarios directamente al interior de la estación, para entrar en espera de la ruta que los conduzca a su destino final. Cuando los usuarios ya saben que ruta deben esperar, naturalmente buscarán la línea de espera de dicha ruta; el tiempo que tarda en ello representa una variable aleatoria que dependerá tanto de las características físicas de la estación, como de ciertos rasgos del usuario.

En los portales o estaciones terminales¹, dada su naturaleza, solo se presenta abordaje para tomar los buses hacia un solo sentido (hacia las estaciones que se encuentran antes), y descenso desde rutas que viene en sentido contrario (desde las estaciones que se encuentran antes). Además, tienen la característica adicional de que despachan buses al inicio de la jornada, para determinadas rutas (las rutas que le corresponden), con una frecuencia específica, la cual puede ser parámetro para una distribución de probabilidad particular que determinará la longitud del intervalo de tiempo que hay entre el despacho de dos buses consecutivos de la misma ruta. Después de haber sido

despachados todos los buses siguen su flujo normal, pero con un comportamiento no determinístico (tal como se plantea a continuación en la sección 3), cumpliendo con su ruta en el STPM, hasta que se termine la jornada.

Aunque en la figura 2 no aparece explícito, es obvio que las dimensiones de las estaciones no permiten un crecimiento infinito de las líneas de espera que se generan en su interior; por lo tanto, las colas limitan, unas a otras su crecimiento, generándose así períodos, en los cuales se deba suspender (o disminuir la tasa correspondiente) el ingreso de usuarios al interior de la estación.

Modelo para el arribo de buses a las estaciones. Si bien los buses actúan como servidores dentro del sistema, éstos cuentan con un ingrediente adicional, el cual es, que no se encuentran en un punto fijo, sino que fluyen a través del sistema de acuerdo a un fenómeno no determinístico. Para tal fin, se establece el tiempo de viaje entre dos estaciones para un bus, cómo una variable aleatoria, cuya distribución de probabilidad dependerá de varios parámetros, como la capacidad de la troncal en ese tramo específico (dado que no necesariamente la capacidad debe ser igual a lo largo de la troncal), y del nivel de tráfico a lo largo del mismo.

En la figura 2, este fenómeno se representa, dibujando los servidores de las líneas de espera para cada ruta mediante líneas punteadas, lo que significa que en realidad no se encuentran en el mismo sitio en donde se genera la línea de espera, sino que en un momento dado, aparecerá para atenderla (recoger a los pasajeros que esperan para abordarlo).

Los otros servidores, que se encuentran a un lado de las líneas de espera para el abordaje,

¹ Como no son puntos intermedios, no se efectúan transbordos para continuar hacia delante; sólo para regresar.

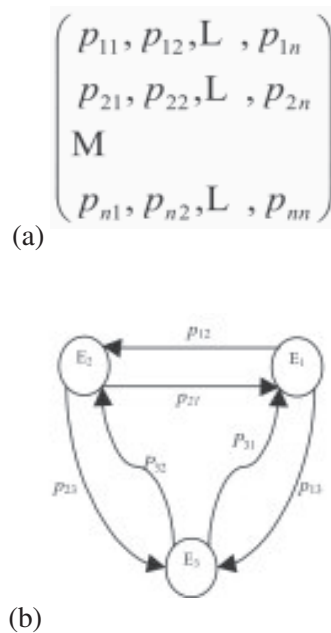


Figura 3. (a) Matriz Origen-Destino para n estaciones. (b) Grafo para 3 estaciones.

representan, el descenso de los usuarios de los buses de cada ruta, pudiendo así (como se ve representado en los conectores), ingresar a la línea de espera para el abordaje de otro bus (en el caso de que le sea necesario realizar un transbordo) o pasar a los torniquetes que conducen a la salida de la estación y del sistema.

Modelo para los transbordos. Para manejar el problema de los destinos de los usuarios en el sistema es conveniente el uso de una matriz origen-destino que esté compuesta por probabilidades (Figura 3A), que de algún modo se refieran a la proporción de los usuarios que ingresan a la estación i , cuyo destino es la estación j .

Para la matriz se tiene

$$i = 1, 2, \dots, n \quad \text{y} \quad j = 1, 2, \dots, n,$$

en donde n es el número de estaciones del STPM, incluyendo los portales. Además se tiene que

$$p_{ij} = 0$$

, pues es apenas natural que el destino nunca será el mismo origen, y se debe cumplir que:

$$\sum_{j=1}^n p_{ij} = 1 \quad , i = 1, 2, \dots, n.$$

De cierto modo, la matriz proporciona probabilidades para la transición entre estaciones (Figura 3B), teniendo en cuenta una relación origen destino sin tener en cuenta los transbordos que puedan ser necesarios.

Por otro lado, para resolver el problema de la selección de la(s) ruta(s) para ir del origen al destino, se cuenta con una Matriz de cobertura, la cual, tendrá un 1 en la posición k,i , si la ruta k se detiene en la estación i , y 0 en caso contrario. Por supuesto se tienen en cuenta los portales, aunque con la restricción de que una ruta puede pasar exclusivamente por dos portales (además de otras restricciones de localización directamente relacionadas con la disposición física de las estaciones y portales en el STPM, de las cuales no se entrará en detalles).

Así, para una pequeña configuración con cinco estaciones y tres rutas, como la que se ve en la figura 3 (A), la matriz será como la mostrada en la figura 3 (B):

Si adicionalmente, se utiliza la información de la matriz para construir un grafo, en el cual los nodos sean las estaciones, y los arcos entre estaciones existan si hay por lo menos una ruta que se detenga en las dos estaciones, se obtendría unos como el de la Figura 4 (c), mediante el cual, al asignarle las distancias correspondientes (distancias entre estaciones), se puede aplicar el algoritmo de la ruta más corta (1) (asumiendo que los pasajeros en verdad

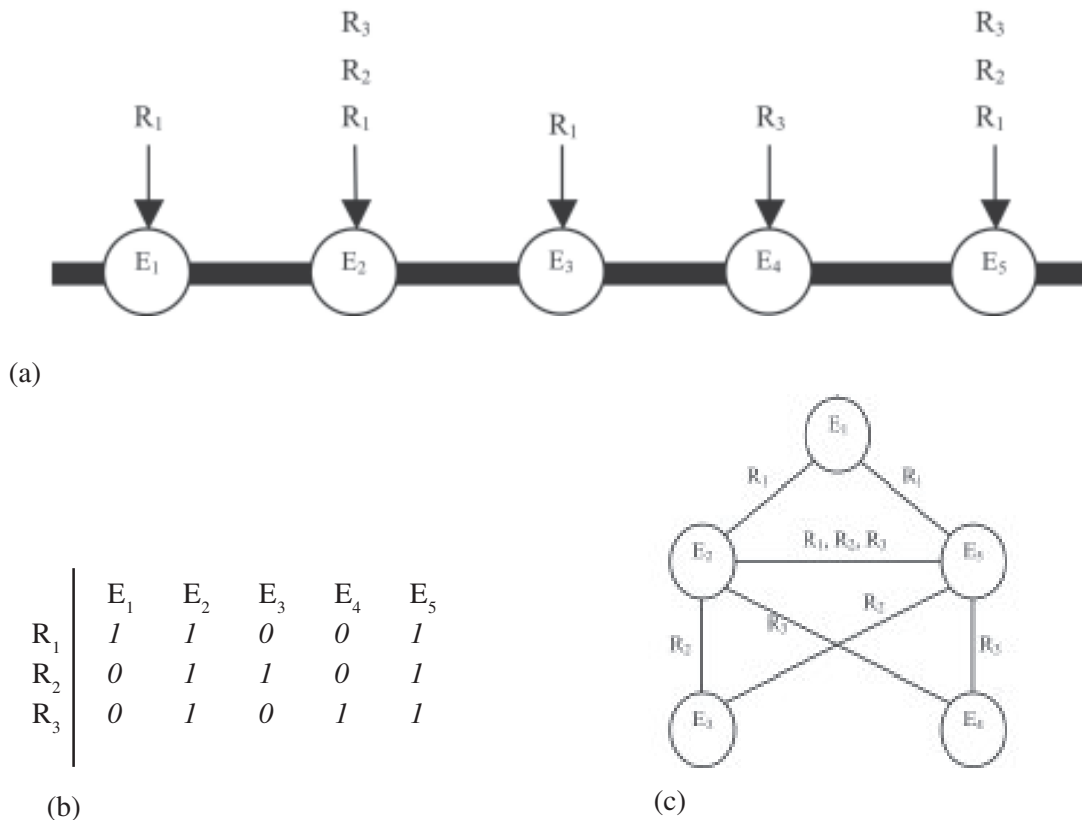


Figura 4. (a)Estaciones y rutas respectivas. (b)Matriz de Cobertura. (c)Grafo resultante.

eligen siempre la ruta más corta) mediante el cual se obtendrán tanto las estaciones intermedias en las cuales es necesario detenerse, como la ruta o rutas que se deben tomar para completar el recorrido.

Finalmente, la integración de los modelos expuestos en las secciones anteriores, en una herramienta prototipo de simulación, en la cual se realiza un registro y seguimiento de los eventos de los cuales dependen las medidas de desempeño a determinar, como lo son, el registro del tiempo de llegada al sistema (a una estación intermedia o terminal), tiempo en las colas para ingreso (taquilla y torniquetes), tiempo en espera antes de abordar el bus correspondiente, tiempo invertido en los transbordos (si estos son necesarios), tiempo de viaje en el bus (el cual en últimas re-

presenta un tiempo de servicio), tiempo en cola para salir del sistema, etc.

Si bien la cantidad eventos, y por ende, de información a manejar, es considerable; la capacidad actual de los computadores es suficiente para manejarla de manera eficiente, permitiendo así, finalmente, con base a dicha información, obtener las estimaciones de las medidas de desempeño de interés.

Conclusiones y recomendaciones

Como se ha mencionado a lo largo del artículo, la posibilidad de reemplazar las suposiciones de los modelos teóricos tradicionales para el estudio de sistemas de líneas de espera, mediante el empleo de un modelo de simulación

flexible, facilita notablemente el estudio de un STPM, y más aún, la realización de Análisis de sensibilidad que brinden soporte a la toma de decisiones. Además, el esquema general del STPM a partir del cual fue desarrollado el modelo, es fácilmente adaptable a varios sistemas de transporte masivo estructurado, como por ejemplo, un sistema férreo, el metro, e incluso otros no necesariamente terrestres. Indudablemente modelos como éste, contribuyen notablemente al desarrollo urbano de nuestras ciudades, no quedando sólo como la realización de un ejercicio académico.

Por otra parte, una de las posibles mejoras para el modelo, ya que éste se centra principalmente en los fenómenos del sistema directamente relacionados con los usuarios, sería el considerar de manera más completa los fenómenos referentes al tránsito de los buses a lo largo del sistema. En el modelo expuesto aquí, la consideración de estos fenómenos aparece de cierto modo limitada, pero sin embargo, sería interesante comparar la precisión de éste modelo, respecto a otro más completo en donde se tengan en cuenta factores

como los niveles de accidentalidad, el impacto del tráfico ajeno al sistema, alteraciones mecánicas en los vehículos, etc.

Referencias

1. **Law AM, Kelton WD.** Simulation Modeling and Analysis. 3TH ED. New York: McGraw Hill: 2000.
2. **Wolff R. W.** Stochastic Modeling and the Theory of Queues. New York: Prentice-Hall: 1989.
3. **Hillier FS, Lieberman GJ.** Introducción a la investigación de operaciones. 6TH ED. México D.F: McGraw Hill: 1997.
4. **Robertazzi TG.** Computer Networks and Systems. Queueing theory and performance evaluation. 3TH ED. New York: Springer: 2000.
5. **Kleinrock L.** Queueing Systems. Vol 1: Theory, Vol 2: Computer Applications. Boston: John Wiley & Sons: 1976.
6. **Sandoval EE, Hidalgo D.** Transmilenio: A High Capacity – Low Cost Bus Rapid Transit System developed for Bogotá, Colombia. Bogotá: Transmilenio S.A: 2001.
7. **Saaty TL.** Elements of queueing theory with applications. New York: McGraw-Hill: 1961.
8. **Pérez L.** Teoría de colas. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de ciencias, Posgrado en Matemáticas: 1985.