

Calibración y Simulación de un Corredor de Transporte Público en Microsimulador de Tráfico Paramics

Arturo Didier, Juan Carlos Muñoz, y Ricardo Giesen
Departamento de Ingeniería de Transporte y Logística, Pontificia Universidad Católica de Chile
Vicuña Mackenna 4860, Macul, Casilla 306, código 105, Santiago 22, Chile; Tel: 562 354 4270
adidier@ing.puc.cl, jcm@ing.puc.cl, giesen@ing.puc.cl

Cristián E. Cortés
Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile
Casilla 228-3, Santiago, Chile; Tel/Fax: 56 2 6894206
ccortes@ing.uchile.cl

RESUMEN

En el diseño y evaluación de medidas de gestión de tráfico, los paquetes de simulación microscópica de tráfico son una herramienta poderosa para cuantificar impactos sobre el funcionamiento de la red vial en casos donde no es posible encontrar resultados analíticos, y además permiten apreciar visualmente sus efectos. La motivación del presente trabajo es simular correctamente el funcionamiento de un corredor segregado de transporte público mediante el uso de PARAMICS, para estudiar su operación. Los principales objetivos son calibrar los parámetros de tráfico para el caso de un corredor ya implementado, cual es Av. Pajaritos, y obtener una red que emule el funcionamiento diario de dicho corredor, de donde será posible evaluar medidas de gestión. Entre los resultados de la calibración, destaca el hecho que los valores obtenidos para parámetros como intervalo (headway) y tiempo de reacción dependen del período simulado, y señalan que los conductores tienden a tolerar mayor densidad en horario punta mañana. Finalmente, se presenta la calibración de parámetros de tráfico, recolección y codificación de datos del funcionamiento actual del transporte público.

Palabras Claves: calibración, microsimulación de tráfico, corredor segregado de transporte público.

ABSTRACT

In the design and evaluation of traffic management measures, traffic microsimulation provides a powerful tool for obtaining results, not possible to be obtained through the use of analytical models. This technique allows having a visual appreciation of the measures' effects. The motivation of this work is to properly simulate the operation of a public transport corridor using PARAMICS, a commercial traffic simulator. The main objectives are to calibrate traffic parameters that represents the real operation of a segregated public transport corridor in Santiago, such as Pajaritos Avenue, and to obtain a network able to emulate the daily operation of this corridor at a microscopic level, in order to evaluate some management measures. The results of the calibration process are promising. Among them, we can mention that values obtained of mean target headway and mean reaction time depend on the simulation period and also provides a picture of the behavior of drivers, who tend to keep higher density in the rush hour morning period. Finally, the calibration of traffic parameters, collection and codification of current operation of public transport are presented.

Keywords: calibration, traffic microsimulation, segregated public transport corridor.

1. INTRODUCCIÓN

Los simuladores de tráfico son una herramienta importante cuando se requiere evaluar proyectos de intervención vial y de gestión de tráfico. En particular, los modelos de microsimulación corrigen en parte las posibles omisiones que hacen modelos macro y/o mesoscópicos. Su importancia radica en la posibilidad de obtener resultados y analizar sistemas para los que no es posible encontrar soluciones analíticas (Daganzo, 1997).

En general, los microsimuladores de tráfico basan el movimiento vehicular en tres modelos: (i) Seguimiento vehicular, (ii) Cambio de pista, y (iii) Aceptación de brechas. Si bien los paquetes comerciales tienen base similar, PARAMICS presenta ventajas comparativas importantes: (i) Tiene un mejor acercamiento al transporte público en cuanto los vehículos que lo conforman tienen tiempos de detención asociados a los "usuarios" que suben y bajan de éstos; y (ii) dispone de interfaz de programación que permite incorporar nuevas rutinas que enriquezcan y/o reemplacen parte de las funciones de las que dispone. Sin embargo, esto es insuficiente a la hora de reflejar apropiadamente la operación de transporte público, en especial al querer evaluar efectos de medidas sobre los usuarios. Para ello, se ha desarrollado el módulo MISTRANSIT (Burgos, 2006) que vía una interfaz de programación, *Application Programming Interface* (API), modela gran parte de los detalles operacionales de transporte público en forma más realista y permite evaluar medidas asociadas a los pasajeros, no considerados como entidades explícitas en microsimulación tradicional.

El presente trabajo incorpora los aportes de Gibson (1997) que propone algunos valores de parámetros para funcionamiento de transporte público; Velasco (2004), quien propone esquemas de calibración y provee valores de parámetros vehiculares ajustados para la realidad nacional que sirven como valores de entrada; y Burgos (2006), quien estudió el tratamiento del transporte público en micro simuladores de tráfico mediante la programación de la aplicación externa MISTRANSIT.

El trabajo se divide en cinco partes: (i) Recolección de datos de entrada al simulador; (ii) Desarrollo de la metodología aplicada; (iii) Discusión resultados de calibración y validación; (iv) Exposición de limitaciones de PARAMICS y alcances módulo MISTRANSIT; y finalmente (v) Presentación de las conclusiones y comentarios.

2. RECOLECCIÓN DE DATOS DE ENTRADA AL SIMULADOR PARAMICS

El simulador PARAMICS tiene tres fuentes de información a ocupar como entrada: (i) Oferta vial; (ii) Oferta de transporte público; y (iii) Demanda, en la que se diferencia al transporte público del transporte privado.

La oferta vial está definida por: (i) Configuración física de la red, la que en este caso se obtuvo a partir de planos digitales en formato Autocad; e (ii) Información operacional, la que reúne datos de la red semaforizada facilitada por la UOCT y que a su vez está optimizada en TRANSYT; y la información referida a intersecciones de prioridad que se obtiene a través de catastro en terreno.

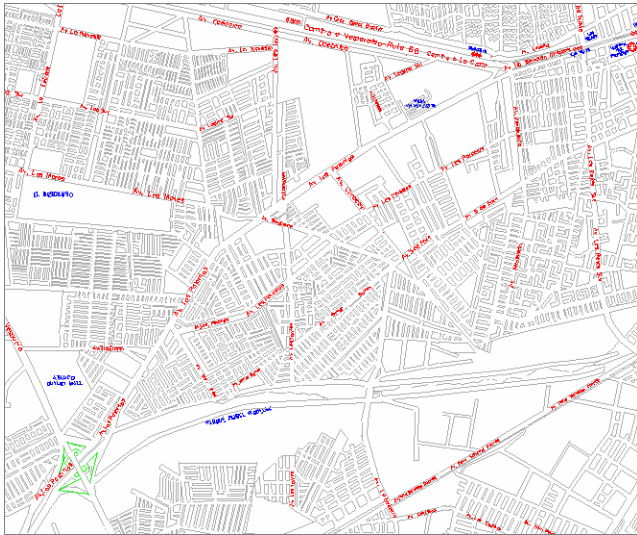


FIGURA 1: Mapa del Área de Estudio

La información de transporte público se obtuvo a partir de un catastro de recorridos que sirven el corredor segregado de Av. Pajaritos, características de vehículos de transporte público (obtenido de Transantiago), indicadores de servicio como frecuencia (obtenida a través de mediciones de DICTUC), y finalmente la ubicación y características de paraderos. Respecto a los paraderos, una característica fundamental es el largo, ya que define el número máximo de vehículos que pueden detenerse simultáneamente en ellos.

En cuanto a la demanda, se debe distinguir entre transporte público y privado. Mientras el transporte privado se representa por los flujos de vehículos, el transporte público considera vehículos y usuarios. Ello se refleja en los datos de entrada fundamentales en uno y otro caso. Como requerimientos para modelar el transporte público, se requieren los siguientes datos de entrada: conteos de subidas y bajadas de usuarios de buses, mediciones de tasas de ocupación de buses en distintos puntos de la red, y una buena representación del comportamiento de los usuarios.

Al respecto, se debe señalar que los recorridos definen demanda fija de transporte público sobre la red, la cual es independiente de la matriz origen destino de viajes de transporte privado. En su codificación se identifican algunas de las limitaciones más serias de PARAMICS: (i) acepta un tipo de vehículo para cada línea; (ii) la demanda de usuarios se define para cada línea; y (iii) en el comportamiento de usuarios. En el caso del área de estudio, la mayoría de los usuarios, al llegar a los paraderos, toma el primer recorrido que los lleve hacia el sector norte (Metro estación Las Rejas). Esto contrasta con la modelación del comportamiento de usuarios en PARAMICS,

donde los usuarios están definidos como propiedad de cada recorrido, lo que distorsiona el comportamiento del transporte público en la simulación.

Para el proceso de codificación del transporte privado, la principal información requerida son los conteos en arcos de acceso a la red. Ello permite construir, en primer lugar, zonas de demanda de la red. Luego, se procede a estimar una matriz origen destino de viajes mediante un modelo gravitacional derivado de maximización de entropía (Wilson, 1970), resuelto a través del algoritmo bi-proporcional de Kruithoff (Kruithoff, 1937). En pos de evitar la sobreestimación de viajes cortos y la subestimación de viajes largos que genera dicho modelo (De Grange, 2007), en la distribución a priori de viajes, se le asigna mayor peso relativo de accesos norte y sur de la red para evitar subestimación de viajes largos. El resto de la asignación inicial depende de la configuración de la red y la consiguiente asignación de ceros en pares origen destino que no tengan asociadas rutas factibles.

El último aspecto respecto del transporte privado corresponde al proceso de asignación utilizado. Los criterios considerados por PARAMICS se basan en elección de rutas mediante criterio todo o nada, con perturbaciones y actualizaciones en la percepción de costos. Dichos criterios no permiten recoger adecuadamente efectos de la congestión en la red, puesto que no hay una distribución de los vehículos en distintas rutas para alcanzar un equilibrio en los costos. Por este motivo, se utiliza el criterio *todo o nada* con costos actualizados cada 15 minutos sin factor estocástico asociado, método que finalmente demostró funcionar razonablemente bien respecto a otros criterios de asignación considerados por PARAMICS.

3. METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN DE LA RED EN PARAMICS

La metodología ocupada en el desarrollo de este trabajo es una adaptación de la propuesta realizada por Velasco (2004), quien asume independencia entre ciertos fenómenos en la red. Con ello, es posible descomponer la simulación de un vehículo en varios fenómenos independientes, que al interactuar definen el comportamiento de la red. Este supuesto es fundamental, puesto que permite abordar el comportamiento vehicular analizando los parámetros individual y consecutivamente. La metodología propone en primera instancia analizar los fenómenos independientes, para luego estudiar cómo estos fenómenos interactúan entre sí.

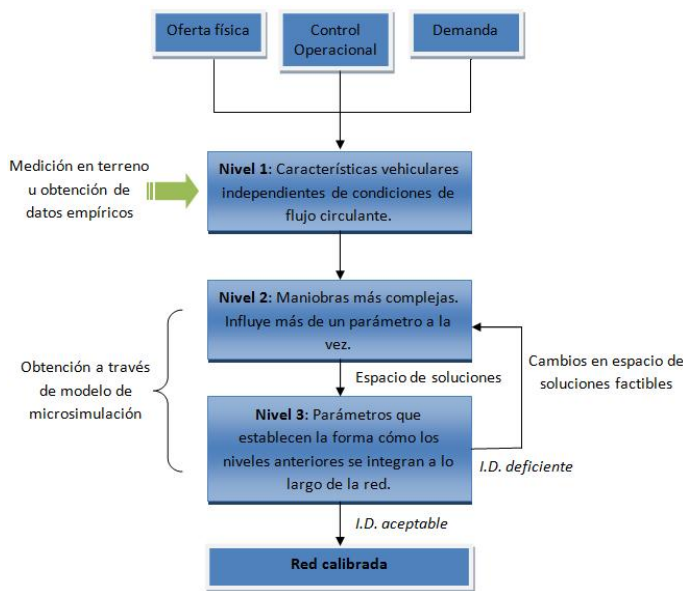


FIGURA 2: Esquema Proceso de Calibración (Velasco, 2004)

Los parámetros que definen el movimiento vehicular se clasifican en 3 niveles. El primero hace referencia a aquellos que son medibles directamente, como por ejemplo, las características físicas de los vehículos. En el segundo nivel se encuentran aquellos parámetros que son propios de cada vehículo pero que no dependen del flujo vehicular de la red. Estos parámetros, eventualmente podrían ser medidos a partir de instrumentos más especializados o eventualmente obtenidos a partir de ecuaciones propias de la cinemática, pero la metodología establece que estos valores no pueden ser incorporados directamente en la codificación de la red. En tercer lugar se encuentran aquellos parámetros que dependen de las condiciones de flujo circulante, y luego, a la integración de los parámetros de los niveles 1 y 2. Los parámetros de nivel 2 y 3 deben ser obtenidos de los experimentos de microsimulación. Para efectos de la calibración, los parámetros de nivel 2 son los que se calibrarán, mientras los de nivel 3 son necesarios para construir un indicador de desempeño que permite establecer cuán bien reproduce la realidad observada cierto vector de valores de parámetros.

De las observaciones en terreno, se dispone de las colas máximas que se presentan en los arcos de acceso a la red, como también de los flujos en dichos arcos. Ambos constituyen parámetros de nivel 3. Velasco (2004) propone el uso del primero, y propone el siguiente indicador de desempeño, que corresponde a la sumatoria de las diferencias absolutas de colas simuladas versus observadas en cada arco de acceso, ponderadas por el peso relativo de las colas respecto del resto de las colas de la red.

$$I.D = \sum_i \text{accesos} \left(\left| \frac{\text{cola}_{simulada,i} - \text{cola}_{observada,i}}{\text{cola}_{observada,i}} \right| \times \frac{\text{cola}_{observada,i}}{\text{cola}_{observada,red}} \right) \quad (1)$$

El procedimiento consiste en someter independiente y consecutivamente los valores de los parámetros de nivel 2 a análisis de sensibilidad, buscando minimizar el indicador de desempeño. Para ello se utilizan distintos módulos que componen PARAMICS: MODELLER (codificación red y animación de la simulación), ANALYSER (análisis visual y extracción de indicadores después de realizadas las simulaciones), y PROCESSOR (módulo que permita correr repeticiones de la simulación con distintos valores de parámetros). Luego, el proceso de calibración en PARAMICS se resume en la Figura 3.

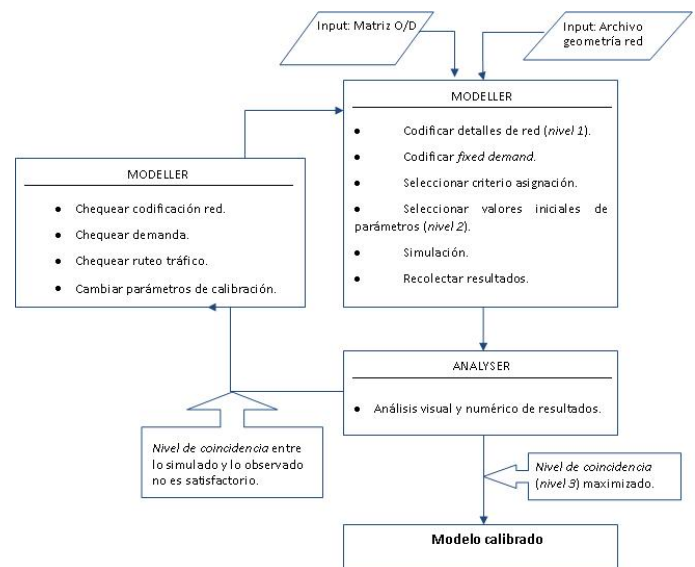


FIGURA 3: Esquema Calibración PARAMICS (Quadstone Ltd., 2003)

4. RESULTADOS DE CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN

Para el inicio del proceso de calibración, se utilizó los valores reportados por Velasco (2004), calibrados para la realidad de una red con tráfico mixto en hora punta mañana mediante el microsimulador AIMSUN. Para los parámetros de PARAMICS que no eran comparables con los utilizados por AIMSUN, se usó como valores iniciales los propuestos por Quadstone en su manual de calibración (Quadstone Limited, 2003).

Si bien los valores iniciales considerados corresponden a redes con características distintas al área de estudio, principalmente por la mayor participación del transporte público en el funcionamiento de la red de Av. Pajaritos, los resultados son consistentes con las experiencias reportadas en la literatura, dado que en el proceso la mayoría de los parámetros conserva el valor asignado inicialmente, o bien se obtiene valores muy cercanos a los obtenidos en estudios similares. Por su parte, los resultados obtenidos para cada período también son coherentes al cruzarlos con el comportamiento de los conductores en cada uno de ellos.

TABLA 1: Valores Iniciales y Resultados del Proceso de Calibración

		Valores iniciales		Resultados PAM	Resultados VAM
Generales	Headway (s)	1		0.9	1.05
	Gap mínimo (m)	1.73		2	2
	Tiempo reacción (s)	0.9		0.85	0.9
	Distancia entrada en cola (m)	10		10	10
	Velocidad entrada en cola (Km/h)	7.2		7.2	7.2
Vehículos	Aceleración máxima (m/s ²)	Auto	2.57	2.57	2.57
		Bus	0.9	0.9	0.9
		CAM	1.1	1.1	1.1
		CAM+2E	1.4	1.4	1.4
		T. Pub.	0.9	0.9	0.9
	Desaceleración máxima (m/s ²)	Auto	3.2	3.2	3.2
		Bus	3.2	3.2	3.2
		CAM	3.2	3.2	3.2
		CAM+2E	3.7	3.7	3.7
		T. Pub.	3.2	3.2	3.2
	Velocidad máxima deseada (Km./Hr.)	Auto	110	110	110
		Bus	90	90	90
		CAM	100	100	100
		CAM+2E	100	100	100
		Micros	80	80	70
Familiaridad		85.00%	85.00%	85.00%	

Punta Mañana

En este período más intenso en volumen vehicular, el intervalo (*headway*) promedio pasa de 1 segundo a 0.9 segundos. Esto se explica por el hecho de que los conductores de la red circulan más rápido por la necesidad de llegar a tiempo para el inicio de sus actividades de trabajo o estudio (principales motivos de viaje que se observan en dicho período) lo que a su vez les exige una mayor atención en la conducción.

La brecha (*gap*) mínima crece de 1.73 metros a 2 metros. Esto se debe a que existe mayor participación del transporte público respecto de la realidad calibrada en estudios anteriores. Los conductores de transporte privado tienden a manejar a la defensiva cuando están cerca de buses lo que explica esta mayor distancia. El parámetro es común para todos los vehículos, por lo que no se puede estudiar cual es el comportamiento de los conductores de transporte público respecto de los vehículos de transporte privado. Cabe destacar que en este caso la diferencia estadística medida a través del estadístico t asociado al test de comparación de hipótesis no es significativa al 95% de confianza, pero pese a ello según la metodología el resultado es válido pues reporta un mejor valor del I.D.

Tiempo de reacción decrece desde 0.9 segundos a 0.85 segundos. Esto es coherente con el valor obtenido para el parámetro *headway*, ya que se requiere mayor atención del conductor al manejar en condiciones más exigentes. Cambios en los valores de los parámetros particulares no inducen mejoras en el I.D. Al hacer la validación según el método propuesto por PARAMICS, que consiste en comparar flujos simulados con los flujos observados en la red en los arcos de acceso, se desprende que la mayoría de los conteos cae dentro del intervalo de confianza definido por las múltiples simulaciones definidas por distintos valores de semillas. Los problemas sólo se aprecian en los arcos del acceso norte a la red (Pajaritos esquina Neptuno), y el arco de Las Torres dirección al poniente, en que los flujos observados son mayores a los obtenidos en las simulaciones.

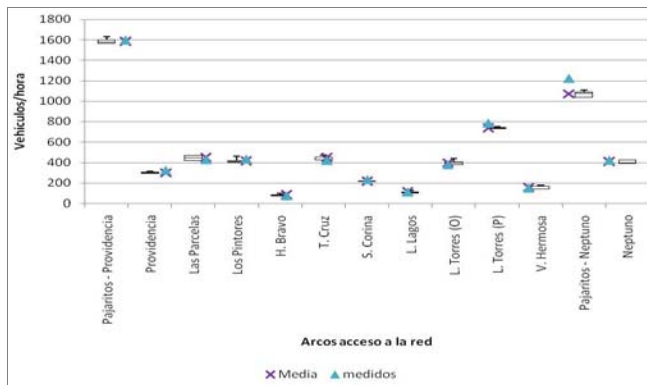


FIGURA 4: Validación Período Punta Mañana

Fuera de Punta

El *headway* promedio obtenido es mayor al obtenido en hora punta mañana: 1.05 segundos respecto de 0.9 segundos. Lo que hace este parámetro es reflejar que los motivos de viaje que predominan en este período, al ser menos restrictivos en exigencia de cumplimiento de horarios, hacen que la conducción también sea más relajada.

El *gap* mínimo permanece en 2 metros, igual que para el período punta mañana. Indica que el parámetro responde más a un criterio de cuidado (dependiendo más de la conformación del parque vehicular que participa en la red) que a uno que dependa de los distintos períodos del día.

El tiempo de reacción es de 0.9 segundos, mayor a los 0.85 segundos obtenidos para hora punta mañana. Coherente con lo dicho para el parámetro *headway* promedio.

La velocidad máxima de transporte público es de 70 Km/h, más lento que los 80Km/h del período punta mañana. En este caso, la diferencia estadística no es significativa al 95% de confianza, pero de todas formas entrega un mejor I.D. La explicación se basa en que (i) el transporte público dispone de infraestructura segregada, y (ii) a diferencia del período punta de la mañana, las exigencias en términos de la demanda son menores, por lo que las líneas privilegian el cumplimiento de metas de frecuencia en lugar de tratar de circular más rápido para ofrecer mayor nivel de oferta, como ocurre en los períodos punta.

Al hacer la validación comparando los flujos observados con los simulados, notamos que los flujos observados están dentro de los intervalos de confianza generados por las múltiples repeticiones de la simulación, la cual considera distintos valores de semillas. El único arco que no cumple con ello es el del acceso norte a la red (Pajaritos - Neptuno), donde los flujos observados son menores a los simulados.

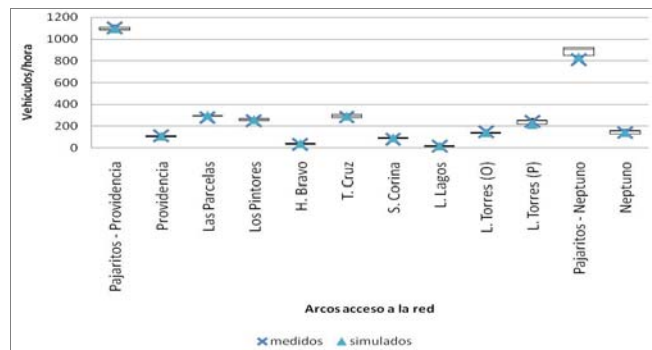


FIGURA 5: Validación Período Fuera de Punta

Finalmente, en cuanto al criterio de asignación utilizado en las simulaciones (rutas mínimas con costos actualizados, RM-E+A), este también es incorporado al proceso de calibración, y es comparado con otros criterios disponibles como rutas mínimas puras (RM-E-A), rutas mínimas con factor estocástico (RM+E-A) y rutas mínimas con factor estocástico y costos actualizados (RM+E+A).

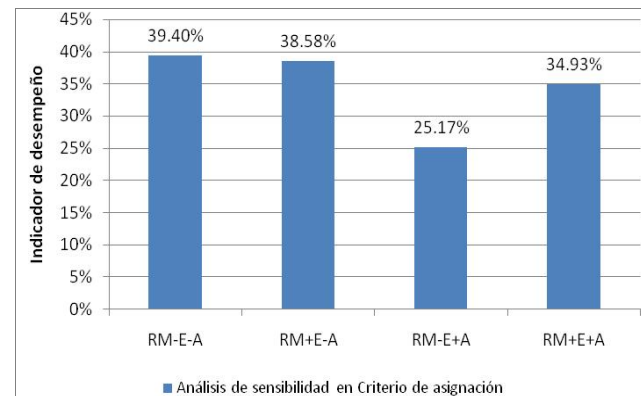


FIGURA 6: Calibración Criterio de Asignación, Período Punta Mañana

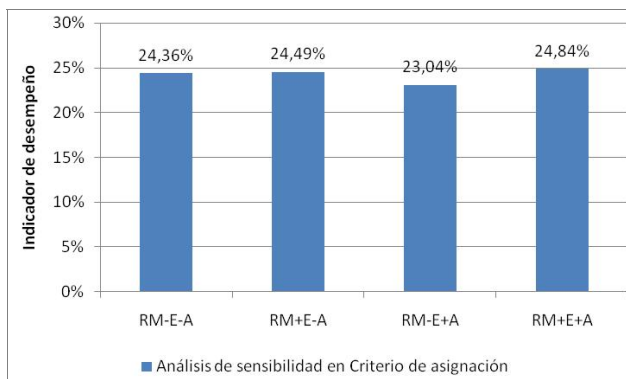


FIGURA 7: Calibración Criterio de Asignación, Período Fuera de Punta

Para ambos períodos de estudio, el criterio de asignación escogido reporta menores valores del I.D. Comparativamente, en hora punta mañana los valores del I.D. varían significativamente producto de los efectos de la congestión en la red. Lo anterior se aprecia claramente del hecho que en hora punta mañana, el criterio más cercano es el que incorpora factor estocástico y actualización de costos; mientras en el caso del horario fuera de punta, el que le sigue es el criterio de ruta mínima basado en información histórica. Luego, es recomendable estudiar la incorporación a la simulación de un criterio que considere la distribución de vehículos entre distintas rutas (para el mismo par origen destino) para minimizar el costo percibido por todos los usuarios, como podría serlo el primer principio de Wardrop. Esto se logra mediante una API, es decir, entregando a PARAMICS una rutina que reemplace los algoritmos específicos que el simulador utiliza para la asignación.

5. LIMITACIONES DE PARAMICS Y ALCANCES DE MISTRANSIT

PARAMICS presenta cuatro limitaciones importantes respecto al tratamiento de la operación del transporte público para el caso chileno. En primer lugar, el nivel de demanda de cada línea de buses en paraderos es propia de cada línea, por lo que cada pasajero generado por PARAMICS, inicialmente, espera sólo un recorrido. Segundo, PARAMICS asume que la tasa de llegada de pasajeros de una línea determinada a cada paradero tiene tasa constante para todo el período de simulación, y lo hacen distribuidos según un proceso de Poisson. Tercero, acepta sólo un tipo de vehículo por línea, cuando en la realidad cada línea puede tener más de un tipo de vehículo asociado. Finalmente, los tiempos de detención consideran puertas exclusivas para subidas o bajadas, lo que resulta inadecuado en el caso del corredor de Av. Pajaritos.

Para subsanar estas limitaciones, Burgos (2006) desarrolló el módulo MISTRANSIT. Este módulo es un conjunto de rutinas desarrolladas mediante API, y permite la incorporación de los pasajeros como actores de la simulación. Estos pasajeros como nuevos entes pueden tener algunas propiedades útiles para efectos de reproducir su comportamiento, como son: (i) Paraderos de origen y destino; (ii) Conjunto de líneas atractivas; (iii) Tiempo de llegada a la red, identificación del bus de origen o distribución Cowan M3 si llega caminando; y finalmente (iv) Velocidad caminata variable para distintos tipos de usuarios.

A la vez, el módulo también incorpora ajustes en tiempos de detención, al no tener puertas exclusivas de subida y bajada los buses, y al considerar tiempos marginales en subidas y bajadas dependiendo del nivel de congestión tanto del bus como del paradero.

La definición de conjuntos de líneas atractivas por pasajero es fundamental para recrear fielmente el comportamiento de los usuarios en el área de estudio, quienes toman “el primer bus que les sirve”, y así reflejar comportamiento de pasajeros que se dirigen hacia el centro de la capital. Lo más importante, es que al poder rescatarse información de los usuarios, se pueden simular medidas de gestión de transporte público para analizar el impacto en ellos.

6. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

Los resultados obtenidos del proceso de calibración no difieren significativamente de los obtenidos por Velasco (2004) para hora punta mañana, y ninguno escapa de los márgenes razonables conformados por resultados de estudios similares. Los cambios que experimentan los parámetros entre ambos períodos de simulación resultan ser coherentes al cruzar los valores obtenidos con el comportamiento de los conductores en ambos períodos simulados.

Si bien la elección de criterio de asignación resultó ser apropiada, se recomienda, mediante una API, implementar un criterio que recoja los efectos de la congestión en forma más realista. En este mismo ámbito, dentro del criterio de *todo o nada* con costos actualizados, si se disminuyera el intervalo en que los costos se actualizan, los conductores podrían internalizar los costos asociados a congestión, y con ello, mejorar el desempeño de la red.

La estimación de la matriz origen – destino a partir de conteos en accesos a la red es un método avalado en la literatura, pero que requiere datos recogidos con exactitud. Esta matriz es perfeccionable con mejores conteos en terreno, y con el uso de simuladores que calibran dicha matriz al ocupar flujos observados en rutas como indicador de ajuste a la realidad.

Finalmente, se aprecia que PARAMICS es uno de los microsimuladores comerciales de tráfico que más profundiza en la representación de las operaciones de transporte público. Pese a ello, tiene una serie de limitaciones que le impiden reflejar apropiadamente el comportamiento de los usuarios de transporte público, en particular en el caso de sistemas con alta participación de transporte público, propias de países en vías de desarrollo. Para subsanar esta situación, la aplicación de la interfaz programable MISTRANSIT, que es una extensión que reemplaza rutinas de PARAMICS para simular más acabadamente la operación del transporte público y de sus usuarios, resulta fundamental a la hora de evaluar medidas de gestión, puesto que a través de este se simula más acabadamente el funcionamiento del sistema integrado de transporte público, y a la vez se puede estudiar los efectos que estas medidas tienen sobre los usuarios.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido financiada por el proyecto anillos tecnológicos ACT-32 “Real Time Intelligent Control for Integrated Transit Systems”.

REFERENCIAS

Burgos, V. (2006). **Modelación de pasajeros, buses y paraderos en microsimuladores de tráfico, revisión y extensiones**. Tesis de grado, Universidad de Chile.

Burgos, V. (2007). Resultados de la modelación microscópica de interacciones vehículos-pasajeros-tráfico para el diseño del sistema BRT. **Actas del XIII Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte**. Santiago de Chile.

Daganzo, C. (1997). **Fundamentals of Transportation and Traffic Operations**. Elsevier Science, Nueva York.

De Grange, L., De Cea, J., Fernández, J. E. (2007) "A Consolidate Approach for the Formulation and Calibration of Entropic Trip Distribution Models", **XI World Conference on Transport Research**. Berkeley, California.

Gibson, J., Fernández, R., Albert, A. (1997). Operación de paraderos formales en Santiago. **Actas del VIII Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte**, 397-408. Santiago de Chile.

Kruithoff, J. (1937). Calculation of Telephone Traffic. **De Ingenieur Vol. 3**, 21-26.

Quadstone Limited (2003). **Quadstone PARAMICS V4.1 Calibration note**. Edinburgh, Scotland.

Velasco, L. M. (2004). **Calibración de parámetros básicos vehiculares para flujo interrumpido en modelos de simulación microscópica: GETRAM en Santiago**. Tesis de Magíster, Pontificia Universidad Católica de Chile.