

---

## CARACTERISTICAS OPERACIONALES, ANALISIS Y SIMULACION DE UN SISTEMA DE TRANSPORTE PUBLICO PUERTA A PUERTA DE ALTA COBERTURA

Cristián Eduardo Cortés Carrillo  
Departamento de Ingeniería Civil  
Universidad de Chile  
Casilla 228-3, Santiago, Chile.  
Fono: (56-2) 6784380, Fono/Fax: (56-2) 6894206  
e-mail: [ccortes@ing.uchile.cl](mailto:ccortes@ing.uchile.cl)

R. Jayakrishnan  
Department of Civil Engineering and Institute of Transportation Studies  
University of California, Irvine, CA. 92967, U.S.A.  
Phone: (1-949) 824 2172, Fax: (1-949) 824 8385  
e-mail: [rjayakri@uci.edu](mailto:rjayakri@uci.edu)

### RESUMEN

En este trabajo se propone el desarrollo y evaluación de un nuevo concepto en sistemas de transporte público de alta cobertura para viajes puerta a puerta. Dicho sistema representa un cambio radical con respecto a sistemas tradicionales *DRT* ("demand responsive transit"). El diseño se basa en operaciones del tipo van/shuttle con un gran número de vehículos distribuidos espacial y temporalmente bajo un sistema de control coordinado que utiliza avanzados esquemas de información y tecnología de punta en temas de comunicación, identificación y posicionamiento de vehículos en tiempo real, en conjunto con sofisticados algoritmos de ruteo diseñados para ser ejecutados también en tiempo real basados en algunos conceptos de teoría de control estocástico. El diseño del sistema es novedoso y asegura a lo más un trasbordo a los viajeros, utilizando terminales de transferencia (hubs) así como porciones de ruta fija y ajustable como parte de los itinerarios de cada vehículo. Una formulación-solución estricta del problema de optimización asociado en tiempo real es infactible. El diseño propuesto aquí permite descomponer el problema en subproblemas computacionalmente abordables basados en sofisticadas reglas de asignación pasajero-vehículo. Adicionalmente, se presenta un análisis cuantitativo basado en simulaciones de una red muy detallada del condado de Orange en Estados Unidos. Este experimento sólo pudo llevarse a cabo después de construir una plataforma de simulación multipropósito, la cual utiliza un conocido paquete computacional de microsimulación. Este modelo fue modificado en forma significativa con el fin de simular operación de vehículos ruteados en tiempo real así como seguimiento y simulación de pasajeros a nivel microscópico. Los resultados de los experimentos de simulación son promisorios en términos de productividad y nivel de servicio, y muestran que el sistema puede ser hasta cierto punto competitivo con el automóvil particular.

## 1. INTRODUCCION

Los sistemas tradicionales de transporte público que operan en Santiago, en los cuales se incluye el bus, metro, y taxi colectivo, están orientados principalmente a satisfacer las necesidades de viaje de un subconjunto amplio de la población, principalmente estratos de ingreso bajo (sin o con poco acceso al modo auto) e ingreso medio, lo cual ha mantenido la partición modal relativamente balanceada entre modos en las últimas décadas. Ahora bien, esta distribución se ha visto seriamente afectada a favor del automóvil particular en el último tiempo, debido en parte al crecimiento en el nivel de ingreso promedio de los habitantes de Santiago, al mayor acceso al automóvil, y al mejoramiento de infraestructura urbana para transporte privado a través de los sistemas de Concesiones. Todo esto, en conjunto con el deterioro y la falta de modernización en infraestructura y tecnología de los modos tradicionales de transporte público masivo (en especial el bus), ha afectado negativamente la partición modal de dichos modos en los últimos años, provocando un serio crecimiento en la proporción de viajeros que prefieren el modo auto en desmedro del bus, o de otros sistemas alternativos.

Esta tendencia puede tener efectos catastróficos en las condiciones de servicio en el futuro, como ha sido demostrado tanto analítica como empíricamente por los especialistas en la materia. Mogridge (1987) demuestra analíticamente que privilegiar inversiones en transporte privado por sobre inversiones en transporte público conduce a una condición de equilibrio más desfavorable desde una óptica de costo del sistema (es decir, al final todos estamos peor, ya que el tiempo de viaje total del sistema aumenta). Además, ha sido demostrado tanto analítica como empíricamente que el tráfico siempre termina adaptándose a los incrementos en capacidad vial, por lo que resulta lógico pensar en aumentar la capacidad de transporte en vez de aumentar la capacidad vial, incentivando aquellos modos que puedan alcanzar una mayor productividad a través de mejores (mayores) tasas de ocupación.

Hoy día es un hecho que en niveles de estrato alto y medio-alto, el modo bus no es una alternativa real y competitiva del modo automóvil particular. Entonces, el desafío es proponer sistemas de transporte público que sean atractivos para este tipo de usuarios, que sean eficientes en términos de productividad, y que ofrezcan niveles de servicio favorables y comparables con los del automóvil, donde el punto clave está en ofrecer tiempos de espera y viaje razonables que realmente motiven al usuario a cambiarse de modo. Una alternativa que pudiera ser hasta cierto punto competitiva en este sentido, sería la implementación de sistemas de transporte personalizado de servicio puerta a puerta, conocidos como “dial-a-ride” o “demand responsive transit systems” (*DRT*). Sin embargo, los sistemas *DRT* tradicionales implementados y estudiados en el pasado, han fracasado rotundamente en atraer usuarios desde el modo auto, debido principalmente a los bajos niveles de servicio observados.

La pregunta es si es posible operar un sistema personalizado de transporte público adaptable a cambios en la demanda -del tipo de los tradicionales “dial-a-ride” o “demand responsive transit systems” (*DRT*)- en forma eficiente, de forma tal que éste fuera capaz de atraer suficiente cantidad de usuarios producto de un razonable nivel de servicio en términos de tiempos de viaje y espera. La respuesta es afirmativa. Sin embargo, una implementación eficiente y realmente competitiva requiere mirar el problema desde una óptica bastante distinta a aquellas usadas tradicionalmente en la literatura especializada.

En esta línea Cortés y Jayakrishnan (2002) proponen un sistema de transporte público personalizado del tipo *DRT* pero con características esencialmente distintas en cuanto a diseño, uso de la tecnología e implementación de algoritmos de asignación de rutas e itinerarios para su eficiente operación. El sistema propuesto ofrece una gran cobertura de servicio (“high coverage”) en el sentido de contar con una gran cantidad de vehículos distribuidos en la red de transporte en todo momento, asegurando a lo más un trasbordo en viajes de hasta 20 kms. El objetivo de este trabajo es evaluar una implementación real y optimizada del esquema propuesto, usando herramientas de control óptimo y técnicas de microsimulación.

En la siguiente sección, una breve revisión bibliográfica es presentada en el desarrollo y experiencia de sistemas del tipo *DRT* en el pasado. A continuación el esquema propuesto es presentado y discutido. En la sección 4 se desarrolla y se explica los algoritmos de inserción y asignación de pasajeros a rutas de vehículos. Entonces, se desarrolla un esquema de simulación y se presenta un caso aplicado, basado en una red de simulación codificada en *Paramics*. Los resultados y alcances de política son entonces discutidos en la sección de conclusiones a la luz de los resultados obtenidos proponiendo las pertinentes líneas de investigación futuras.

## 2. DESCRIPCION DEL PROBLEMA Y ANTECEDENTES TEORICOS

A pesar que los sistemas *DRT* han estado operando en ciudades de los Estados Unidos desde hace bastante tiempo, investigación de buen nivel, especialmente en servicios a gran escala, sólo puede encontrarse en la literatura especializada después de los años 70. De hecho, el trabajo más interesante e intensivo en este campo empezó a generarse en el MIT a partir de 1970, en el marco del conocido proyecto CARS a cargo del Profesor Nigel Wilson. Como resultado, se desarrollaron varios algoritmos heurísticos y un proyecto piloto del MIT en Rochester (Wilson y Colvin, 1977). La principal conclusión de dicha experiencia fue que, tal vez debido a las pobres herramientas computacionales disponibles en ese tiempo, el despacho manual era comparable y a veces mejor que aplicar los algoritmos implementados (Black, 1995). Aunque se han invertido muchos recursos en investigación especializada en este tipo de problemas en los últimos años, no existen a la fecha metodologías eficientes ni resultados de simulaciones que resuelvan de buena forma problemas del tipo *DRT* a gran escala. En los últimos años, Dial (1995) ha propuesto la implementación de un sistema *DRT* incorporando tecnología de punta en el desarrollo de sistemas y control de vehículos (conocido como sistema *ADART*). En la misma línea, Teal (1993) y Stone *et al.*(1993) describen la evolución de este tipo de sistemas, poniendo énfasis en temas de modernización de operaciones del tipo “dial-a-ride”, evaluando las ventajas de incorporar “Automatic Vehicle Location Systems” (*AVL*) en la implementación de tales sistemas.

En temas de diseño, Wilson *et al.*(1976) fueron los precursores en diseñar sistemas incorporando el concepto de zonificación, desarrollando sistemas *DRT* a nivel intra e inter-zonal. Stein (1978) extiende dicha metodología, agregando vías troncales conectando sub-regiones y puntos de transbordo en el análisis. Esta idea de combinar vías troncales con sub-sistemas *DRT* es conocida como el desarrollo de sistemas híbridos, y ha sido tratada tanto analíticamente como vía simulación por algunos autores en el último tiempo (Liaw *et al.*,1996; Hickman y Blume, 2000, entre otros). Debe notarse que en ninguno de estos trabajos, el posible impacto en la demanda producto del número de trasbordos implícito en cada diseño particular, es considerado como un

problema. Nuestra primera premisa y la base del diseño presentado en la siguiente subsección se basa en suponer que la impedancia (desutilidad) al número de trasbordos crece de manera exponencial, y por lo tanto proponer sistemas que sean flexibles pero que requieran más de un trasbordo no parece del todo razonable.

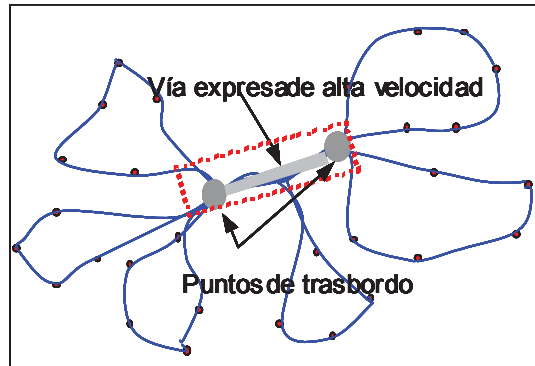
Respecto del desarrollo de algoritmos, el problema de ruteo y determinación de itinerarios para servicios puerta a puerta (usualmente con demanda conocida a priori) se conoce como “Pick-up and delivery problem” (*PDP*) en la literatura. Savelsbergh y Sol(1995) y Bodin *et. al*(1983) entregan excelentes revisiones de la evolución y tratamiento del problema en los últimos años. A pesar de que algunos autores han tratado de encontrar procedimientos garantizando soluciones exactas, la mayoría de la investigación se ha basado en soluciones heurísticas. Entre ellos, se pueden mencionar los bien conocidos *GSR* (“Grouping/Clustering/Routing”), y *ADARTW* (“Advanced Dial-a-Ride algorithm with Time Windows”) debidos a Jaw *et. al*(1986).

El principal problema de los sistemas *DRT* implementados en el pasado en ciudades de Estados Unidos, son las muy bajas tasas de ocupación encontradas en buses/vans y los por ende altísimos costos de operación involucrados. Los costos de operación por pasajero son para estos sistemas, según antecedentes entregados por Black (1995), del orden de US\$ 10.00 (de hecho, en la actualidad, el costo ascendería a US\$ 20.00) debido a tasas de ocupación del orden de 1.3 pasajeros por vehículo en promedio. Los estudios muestran que los tiempos de espera en el lugar de origen, en promedio eran del orden de 2 a 3 veces mayores que el tiempo total del viaje en automóvil particular. Esto se ha traducido en sistemas con muy poca cobertura de vehículos, muy bajas tasas de ocupación, y por supuesto, en sistemas absolutamente no competitivos con el automóvil particular. Es por eso que la mayoría de ellos han sido orientados al servicio de personas con alguna discapacidad física o bien adultos mayores.

Lo que es un hecho, es que si queremos diseñar un sistema del tipo *DRT* operando en forma socialmente eficiente y económicamente rentable, las tasas de ocupación de los vehículos deben necesariamente incrementarse, alcanzando niveles promedio de al menos 3-4 pax/veh. Lo anterior, sólo sería posible aumentando considerablemente el número de vehículos, disminuyendo considerablemente el lapso entre la llamada y el servicio, resultando en un sistema hasta cierto punto atractivo para los usuarios del automóvil. Si los vehículos deben llegar prontamente al lugar de la llamada, podríamos necesitar en todo momento un vehículo disponible en una distancia de 3 a 5 kilómetros del lugar de origen. El tiempo de espera en el punto de origen, que podría ser el hogar en el caso de viajes punta mañana, no debiera ser mayor que 10-15 minutos. El diseño debería asegurar a lo más un trasbordo para un usuario viajando una distancia de 15-20 kms., aspecto que puede ser relevante en un esfuerzo por atraer mayor demanda desde otros modos. Estamos seguros que un aspecto clave es la disponibilidad de vehículos reduciendo tiempos de espera, y esquemas de información en tiempo real reduciendo incerteza.

Supongamos que somos capaces de resolver un problema de este tipo a gran escala (con más de 1000 vehículos) con demanda incierta. Lo más probable sería encontrar soluciones donde los vehículos realizarían operaciones de carga y descarga de pasajeros en zonas residenciales y comerciales moviéndose en redes locales, para luego ingresar a vías expresas cuando les fuera posible sin mayores reruteos. Esta es la lógica de diseños del tipo alimentador *DRT* combinado con líneas de transporte público expreso, estudiadas en el pasado. Sin embargo, para viajes

puerta a puerta, tal diseño requiere de al menos dos trasbordos como se aprecia en Figura 1. Los puntos de transferencia agregan flexibilidad a la operación así como al uso de vehículos, especialmente a lo largo de corredores expresos, donde múltiples vehículos pueden hacer un mejor uso de vías expresas o corredores segregados. Además, la productividad del sistema debiera mejorar bajo este esquema por la posibilidad de los vehículos de alimentar otros vehículos en puntos de trasbordo. El punto aquí, es como poder diseñar un sistema de tales características, pero en el cual los pasajeros realicen a lo más un trasbordo. Cortés y Jayakrishnan (2002) proponen un sistema de estas características, llamado *HCPPT* (“High Coverage Point-to-Point Transit System”), el cual se describe en detalle a continuación.



**Figura 1: Esquema de Solución Restringido**

### 3. HCPPT: ESQUEMA CONCEPTUAL

El sistema *HCPPT* podría parecer similar a los conocidos sistemas “Paratransit” o simplemente a un sistema de taxi tradicional. Sin embargo, éste es substancialmente distinto en términos de cobertura de vehículos, diseño, ruteo coordinado, y aplicación de la tecnología en la provisión de información tanto al usuario como al operador del servicio. El esquema se basa en la operación de gran cantidad de vehículos (que podrían ser vans o mini-buses) los cuales son re-ruteados en tiempo real cada vez que una nueva llamada (solicitud de servicio) es recibida. Cada vehículo es asignado a servir ciertas áreas (“celdas”), digamos por ejemplo un hexágono de 2.5 km. por lado. Dentro de estas celdas los vehículos pueden recoger o dejar pasajeros en el lugar exacto de origen o destino según sea el caso. Es importante notar que dentro de cada celda la ruta de los vehículos no es fija y debe adaptarse a las condiciones de demanda y a la presencia de otros vehículos en la misma zona de acuerdo a ciertas reglas de optimización. Los vehículos se mueven en dirección a ciertos terminales de transporte público (“hubs”). Cada hub estaría asociado, por ejemplo, a cubrir siete de las ya mencionadas celdas (agrupadas como un “cluster de celdas”, o simplemente “cluster”).

En síntesis, la ruta de cada vehículo se compone de dos fases, la primera en la cual ésta cambia dinámicamente de acuerdo con las condiciones del sistema, y la segunda en la cual se mantiene invariante. Así, cada vehículo estaría asignado a cubrir solamente un cluster (que llamaremos “cluster origen”), dentro del cual su ruta sería adaptable a cambios en la demanda (fase ajustable). Luego, dicho vehículo tendría un tramo de ruta fijo a lo largo de una línea troncal, en dirección a un hub o terminal asociado a un cluster adyacente a su cluster origen (fase fija).

Ambas etapas en la ruta de cada vehículo se van alternando durante el período en el cual el sistema se mantiene operando. Así, si un pasajero quisiera viajar entre dos clusters distintos necesariamente tendría que hacer un trasbordo. Sin embargo, dada la flexibilidad del diseño, sus opciones de viaje (posibles combinaciones) serían diversas. En Figura 2 se muestra un ejemplo del esquema propuesto así como la forma de operación de un vehículo *HCPPT* cualquiera.

Como primera alternativa, dicho pasajero podría ser recogido por un vehículo cuya fase ajustable (ruta variable) es en cluster 1 dirigiéndose hacia el hub 4 (fase fija). Este vehículo haría operaciones de trasbordo en hub 4 y volvería a la zona 1 (por el eje 4-1) donde comenzaría de nuevo su fase ajustable en cluster 1. El usuario haría un único trasbordo en hub 4, desde donde podría tomar cualquier vehículo cuya fase ajustable es en cluster 4, regresando desde cualquier otro hub (ya sea, 1, 2, o 3), el cuál lo dejaría en su destino B. Una opción alternativa para satisfacer sus necesidades de viaje sería seleccionar un vehículo cuyo hub de destino es por ejemplo, el hub 2, en cuyo caso el trasbordo debiera realizarse en el hub de origen del viaje (en este caso, hub 1) desde donde el usuario tendría que tomar un vehículo retornando desde hub 1 a su “cluster” origen (que en este caso sería cluster 4), dejándolo en su destino B. Ambas opciones de viaje se muestran gráficamente en Figura 3.

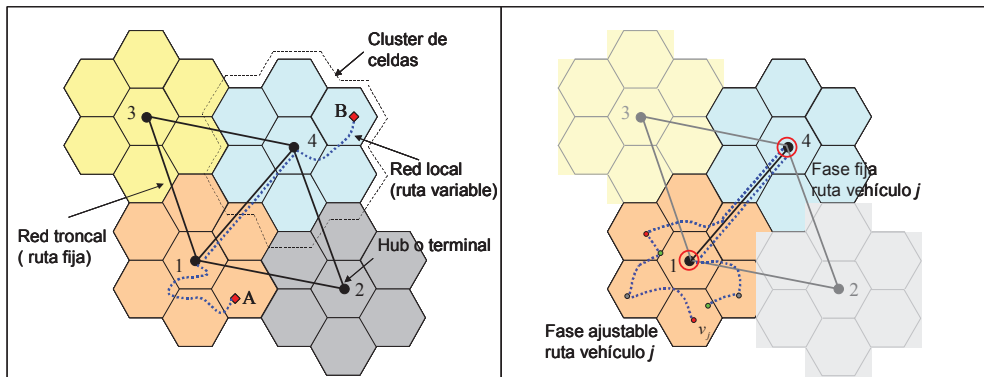


Figura 2: Esquema propuesto

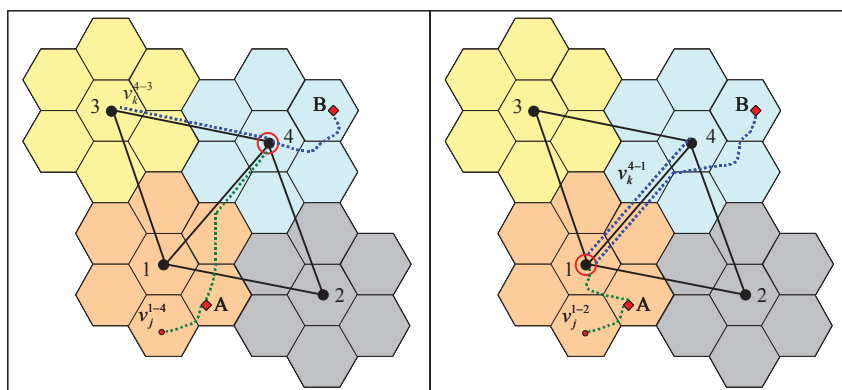


Figura 3: Opciones para viajar desde origen A hasta destino B

La flexibilidad en las opciones de viaje y los conceptos de optimalidad subyacentes en la especificación y formulación de las funciones de costo, aseguran la eficiencia del sistema en términos de operación. La especificación de funciones de costo adecuadas en conjunto con reglas heurísticas apuntando a mejorar el funcionamiento del esquema propuesto, incrementa las tasas

de ocupación a lo largo de líneas troncales, reduciendo al mismo tiempo excesivos tiempos de espera en lugares de origen y puntos de trasbordo. La mayor parte de los viajes estarían restringidos a celdas dentro del mismo cluster o bien a celdas pertenecientes a clusters adyacentes. Sería también posible servir viajes de mayor longitud, entre clusters no adyacentes (para un viaje desde la zona 2 a la 3 por ejemplo). En este último caso, la diferencia es que los usuarios tendrían que cubrir dos tramos de ruta fija (ya sea 2-4-3 o bien 2-1-3). Considerando hexágonos con lados de 2.5 kms., el esquema podría servir viajes de hasta 20 kms. Debe notarse que las celdas podrían tener cualquier forma de acuerdo a los patrones de demanda en aplicaciones reales, y a la estructura de las redes de transporte dentro de cada “cluster” (ver por ejemplo Newell, 1980). Por otra parte, la operación a gran escala de este sistema, tiene sentido solamente si se opera con suficientes vehículos, del orden de 1 a 2 veh./km<sup>2</sup> como mínimo (gran cobertura de servicio).

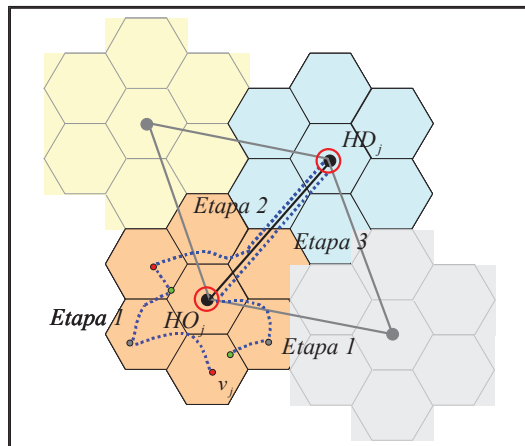
Algunas características importantes del sistema propuesto serían las siguientes: 1) Uso de vehículos relativamente pequeños (tipo van/shuttle). 2) Gran cobertura de servicio. 3) Tarifas considerablemente menores que las del modo taxi, debido principalmente a la posibilidad de obtener tasas de ocupación bastante mayores operando un sistema de este tipo en forma muy eficiente. 4) Acceso a la tecnología, tanto en lo que respecta a la información a la cuál pueden acceder los usuarios (como por ejemplo, tener acceso a tiempos de espera y viaje esperados, vía Internet), así como información por parte del operador de la localización de su flota en todo momento, vía GPS u otro sistema de localización disponible. 5) La existencia de fases de ruta fija y ruta ajustable en el diseño. 6) Viajes de hasta 20 km. posibles haciendo a lo más un trasbordo, de acuerdo con los diseños propuestos aquí.

#### **4. DESCRIPCION DE LOS ALGORITMOS DE RUTEO**

El sistema descrito aquí es particularmente atractivo para ser implementado utilizando esquemas y algoritmos asignando rutas en tiempo real, resolviendo un problema hasta cierto punto similar al bien conocido “multi-vehicle pick-up and delivery problem”, pero restringido al diseño y operación propuestos. Lo anterior permite descomponer el problema original en varios subproblemas más sencillos de resolver, además de agregar mayor flexibilidad a la operación, principalmente por la inclusión de un trasbordo en el concepto original. Adicionalmente, se incorpora un esquema de control dinámico APC basado en la actualización de distribuciones empíricas asociadas con tiempos de viaje y funciones de costo, con el objeto de predecir las decisiones del despachador basándose en información observada del sistema en tiempo real. Lo anterior resulta relevante por el hecho que las decisiones de asignación de pasajeros a vehículos podría eventualmente cambiar dinámicamente debido a dos razones: primero, por la necesidad de asignar e insertar nuevas llamadas (generadas en tiempo real) en las rutas originales, y segundo, por el sólo hecho de tener que ajustar las rutas de los vehículos cada vez que se produzca algún cambio en las condiciones de equilibrio entorno a ellas. Los algoritmos de ruteo en detalle pueden encontrarse en Cortés (2003).

Básicamente, los vehículos realizan tres etapas durante un ciclo de su viaje: 1) el vehículo está dentro de la zona ajustable recogiendo y dejando pasajeros en sus lugares de origen y destino respectivamente, 2) el vehículo decide entrar al corredor de alta velocidad y dirigirse al hub de destino y 3) el vehículo vuelve del hub de destino hacia el hub de origen, a lo largo de la vía

expresa, recoge pasajeros en su hub origen y comienza la etapa 1 de su viaje una vez más. En Figura 4 se presenta esquemáticamente las distintas etapas del viaje descritas aquí. En este punto, debe hacerse algunas aclaraciones. Una vez que el despachador decide que el vehículo entre a su fase ajustable (etapa 2), éste puede ingresar directamente a través del corredor (en el punto óptimo que minimice su tiempo de viaje desde la posición actual hasta el hub destino) o bien puede decidir detenerse primero en el hub origen, y desde ahí emprender el viaje hacia el hub destino. Esta decisión depende de si en el vehículo se encuentra algún pasajero cuyo destino sea distinto al destino asignado al vehículo. Estas consideraciones han sido incorporadas en la función de costo de inserción de la cual se decide la asignación vehículo-pasajero. Otra regla de operación está asociada a la etapa 3, en la cual el vehículo decide regresar desde el hub destino hacia la zona origen. Si el vehículo está completo, éste podría empezar distribuyendo pasajeros sin tener que pasar necesariamente por el hub origen, antes de volver a la etapa 1. Dicha decisión depende también de otros vehículos que estén regresando y de la carga de pasajeros esperando en cada hub por servicio. En todo caso, siempre en esta etapa un tour de distribución inicial debe ser calculado ya sea para distribuir pasajeros recogidos en el hub destino, o en el hub origen, o bien en ambos. Técnicas heurísticas para resolver el problema del vendedor viajero son usadas para computar esta distribución inicial cerrando el ciclo con un lugar atractivo de arribo del vehículo una vez que termina la distribución, dependiendo de la demanda potencial y de la distribución de otros vehículos dentro de la zona origen.



**Figura 4: Etapas de Operación Vehículo j**

Adicionalmente, se ha implementado una serie de mejoras heurísticas asociadas con la operación en terminales o el reposicionamiento en tiempo real de vehículos no asignados a ninguna tarea estando aún en etapa 1. En el caso de los terminales, es fundamental agrupar los pasajeros basándose en condiciones de adyacencia así como de tiempo de espera. Otra regla de operación muy relevante tiene relación con la decisión de enviar o no un vehículo a la fase fija de su ruta, es decir, adoptar un criterio para decidir cuando dejar de realizar operaciones dentro de la zona de ruta variable y decidir entrar al corredor expreso hacia el hub vecino asignado (en otras palabras, cuando pasar de la etapa 1 a la etapa 2). Esta decisión, depende de la impaciencia de los usuarios dentro del vehículo, del tiempo que el vehículo ha estado circulando dentro de la zona que admite reruteos y de las condiciones y estado de otros vehículos moviéndose hacia y desde la red troncal al instante de la decisión. Todas estas reglas y algoritmos han sido desarrollados



analíticamente y no han sido incluidos en este trabajo sólo por falta de espacio. El detalle de las formulaciones puede encontrarse en Cortés (2003).

## 5. ESQUEMA DE SIMULACION

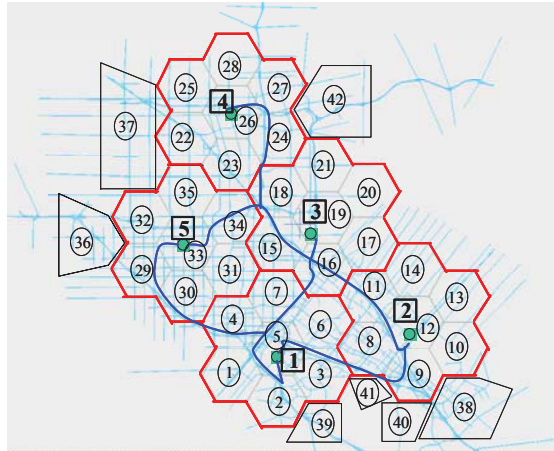
El diseño propuesto necesariamente debe evaluarse como un sistema dinámico, ya que debe ser actualizado en tiempo real bajo reglas específicas de optimización. Así, es necesario recoger de alguna forma los cambios dinámicos en la asignación de tráfico (*DTA*) utilizando una plataforma de simulación que pueda recoger tales efectos. Además, el funcionamiento de este esquema debiera ser altamente sensible a cambios en la operación a nivel de terminales, y a nivel de paradas (ya sea para dejar o recoger pasajeros), por lo cual es absolutamente necesario realizar simulaciones de tráfico a nivel microscópico con el objeto de recoger los efectos a nivel de operación específica de vehículos, que debieran ser relevantes en la actualización de las reglas de operación en la toma de decisiones y en definitiva, en la evaluación global del sistema.

Oh *et al.* (2000) desarrollaron un esquema híbrido de simulación integrando el modelo de microsimulación *Paramics* (PARAllel MICROscopic Simulation), con los modelos de comportamiento y elección de ruta implementados como parte del modelo macroscópico de asignación dinámica DYNASMART (Dynamic Network Assignment Simulation Model for Advanced Road Telematics, Jayakrishnan *et al.*, 1994), de tal forma que el simulador integrado podía evaluar esquemas de información en ruta a nivel microscópico usando modelos de comportamiento y elección de ruta a nivel macroscópico. Este enfoque se basa en la integración de redes en dos niveles de abstracción y comunicación respecto de la posición de los vehículos entre la red detallada (requerida por *Paramics*) y la red más abstracta (requerida por DYNASMART), cuyo detalle sólo incorpora aquellos nodos en los cuáles debe tomarse una decisión a nivel de ruta. Las decisiones de ruta para cada vehículo son procesadas a nivel de la red más abstracta (que en adelante llamaremos ABSNET), y son entonces transmitidas a la simulación a nivel de red mucho más detallado donde se controlan los vehículos a nivel microscópico. Jayakrishnan *et al.* (2003) utilizaron dicha plataforma, pero esta vez para simular sistemas de transporte público tales como *HCPPT*. Se desarrollaron sofisticadas estructuras de datos (a nivel de red, vehículos y pasajeros), implementando cada uno de los algoritmos y reglas asociadas al esquema a nivel agregado, mientras que el movimiento de los vehículos, las operaciones terminales y las paradas en medio de los arcos (simulando las operaciones de carga y descarga de pasajeros) fueron simuladas a nivel microscópico desagregado. Usando esta lógica basada en una interfase de comunicación entre ambos niveles de abstracción, simulamos un caso para la red del condado de Orange en Estados Unidos. El detalle de la simulación y los resultados obtenidos se discute en la siguiente sección.

## 6. SIMULACION BASADA EN LA RED DEL CONDADO DE ORANGE (E.E.U.U.)

En esta sección, el estudio de un caso real simulado es presentado, basándose en el esquema híbrido de simulación descrito en sección 5. La red de microsimulación tiene 12.691 arcos y 7.500 nodos. Se construyó la correspondiente ABSNET obteniendo una red con 5.844 arcos y 2.994 nodos, lo cual significa una simplificación de más del 50 % en términos de almacenamiento y manejo computacional. A este nivel se trabajó con demanda fija para el nuevo

servicio (como un porcentaje de la matriz de autos) distribuida homogéneamente en cualquier punto factible de los arcos de simulación. El área total es del orden de 550 km<sup>2</sup>, de donde la región se dividió en 5 clusters, atendiendo a razones topológicas y con el fin de mantener un cierto balance en el largo total de vías dentro de cada cluster. Cada cluster tiene entonces del orden de 92 km<sup>2</sup>. Las celdas fueron distribuidas tratando de cubrir toda la red vial, sin embargo algunas regiones adicionales (asociadas al cluster más cercano) fueron agregadas con el fin de no dejar ningún arco de la red fuera del área de servicio. En total, 35 celdas más 7 regiones adicionales fueron codificadas, según se aprecia en Figura 5.



**Figura 5: Distribución de Clusters y Celdas**

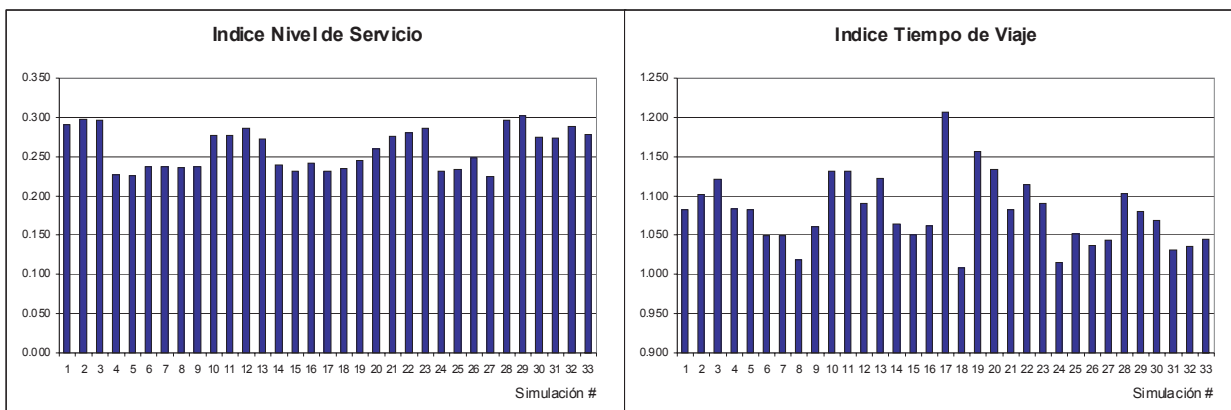
La demanda por el servicio fue generada en forma paramétrica considerando un 5 % de la demanda de automóvil, lo que a nivel global representa un valor bastante considerable. En zonas de alta demanda, la intensidad de llamadas es del orden de 30 llamadas por hora por km<sup>2</sup>. Usando un método simplificado en base a alcanzar una cierta productividad esperada, se calculó una oferta necesaria de 820 vehículos, distribuidos en los 5 clusters de acuerdo con los requerimientos de demanda. Se realizaron numerosas simulaciones para diversos escenarios, probando varias reglas de ruteo, estrategias y sensibilizando respecto de algunos parámetros importantes en la función de costo. Finalmente, se consideraron las mejores 30 a 33 simulaciones y se analizaron 2 indicadores cuantificando el nivel de servicio del sistema y la eficiencia del mismo bajo diferentes condiciones de simulación, incluyendo la modificación del tamaño de flota en algunos casos. De acuerdo con la definición de Black (1995), calculamos el índice nivel de servicio a nivel de hub  $\phi_i$  como

$$\phi_i = \frac{\text{Tiempo de espera promedio en el punto origen}}{\text{Tiempo de viaje promedio puerta a puerta}} \quad (1)$$

donde el tiempo de viaje en el denominador es calculado como el promedio desde un hub a todos los hubs adyacentes. El tiempo de viaje promedio puerta a puerta es calculado para el caso que no exista inserción alguna (caso del automóvil particular o el taxi), el cual es calculado directamente con el resto de los vehículos de la red *Paramics*. El otro indicador introducido es el índice tiempo de viaje definido a nivel del sistema como

$$(2)$$

Los resultados obtenidos a nivel de índices para diversas simulaciones se muestran en Figura 6.



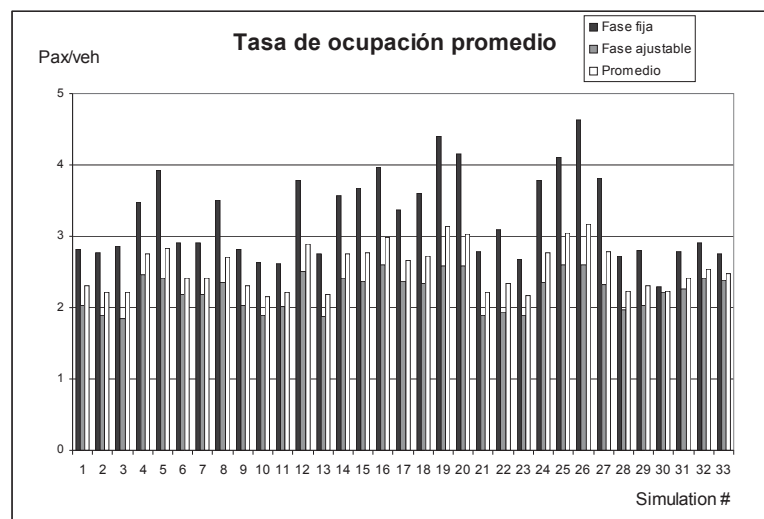
**Figura 6: Índices Nivel de Servicio y Tiempo de Viaje para CPT**

El detalle del tipo de estrategia utilizada en cada simulación no es relevante en el contexto de este trabajo. Sólo cabe destacar que agrupar pasajeros según destino en terminales siempre mejora los tiempos de viaje, por ejemplo al comparar simulación 17 (sin estrategia de colas) con simulación 18 (con estrategia de colas) bajo las mismas condiciones. Otra estrategia que parece importante es el reposicionamiento de vehículos sin tareas asignadas en Etapa 1. Estas simulaciones siempre mejoran en términos de tanto nivel de servicio como tiempo de viaje. Esta estrategia, por simple que parezca es fundamental, ya que la idea es enviar el vehículo hacia el lugar con mayor probabilidad de ser utilizado para servir un nuevo cliente en tiempo real. La idea es enviar el vehículo a aquella celda con mayor indicador demanda-capacidad, que no es más que la razón entre demanda esperada en una celda sobre el número de asientos disponibles, considerando la capacidad remanente de todos los vehículos en etapa 1 en dicha celda al momento de la decisión (el indicador es medido en pasajeros/asientos-hr.). Un criterio adecuado para decidir cuando cambiar de etapa 1 a etapa 2 también mejora el valor de estos indicadores.

Se encontró valores del tiempo de espera (tanto en el origen de la llamada así como en terminales) de hasta 11 minutos. Estos valores son sin duda comparables con servicios de taxi, y definitivamente mejores que cualquier sistema *DRT* implementado en el pasado. El índice nivel de servicio  $\phi$  representa la importancia del tiempo de espera en el lugar de origen (hogar del cliente normalmente) comparado con el tiempo de viaje (en estos casos del orden de 40 minutos para viajes entre zonas adyacentes en la punta mañana). Sistemas *DRT* tradicionales muestran valores de hasta 2 o 3 (es decir tiempos de espera de hasta dos o tres veces más que el tiempo del viaje en sí) los cuales eran inaceptables, sin embargo aquí se encontraron valores entre 0,2 y 0,3, muy razonables y hasta atractivos. El índice tiempo de viaje por otra parte, muestra la razón entre el tiempo de viaje entre nuestro sistema y un sistema alternativo de servicio puerta a puerta. Es decir,  $\rho = 1,10$  significa que el tiempo de viaje resultante es 10 % más que aquél del servicio competitivo. Notar que en el peor de los casos  $\rho$  nunca excede 1,206, que en todo caso es mucho mejor que el obtenido en estudios previos de sistemas *DRT*.

Finalmente, es fundamental tener una medida de la productividad del sistema propuesto. Para eso calculamos la tasa de ocupación promedio (en pasajeros/vehículo) separando la fase fija de la

fase ajustable, obteniendo los resultados que se muestran en Figura 7. Como era de esperarse, en todas las simulaciones la fase fija presenta valores de productividad mayores que la fase ajustable, mostrando las ventajas de implementar un sistema del tipo *HCPPT*, donde los vehículos pueden alimentar otros vehículos en puntos de transferencia, aumentando la productividad del sistema como un todo. La carga mayor (3,13 pax/veh) se obtiene para una simulación en la cual 75 vehículos fueron removidos de la operación. En dicho caso, el tiempo total de viaje no cambió radicalmente comparado con otros mejores pero con menor productividad (42,22 minutos versus el mínimo valor de 37,82 minutos en promedio). Por lo tanto, esto implica que el tamaño de flota debiera ser también analizado en conjunto con las reglas de ruteo en un contexto global.



**Figura 7: Resultados de Productividad**

## 7. COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

En este trabajo se analiza en detalle las ventajas y desventajas de un sistema de transporte público de alta cobertura con servicio puerta a puerta, competitivo hasta cierta medida con el automóvil particular. El diseño propuesto ha sido complementado con el desarrollo de sofisticadas herramientas de ruteo y estrategias complementarias basadas en métodos heurísticos (ver Cortés, 2003), las cuales no han sido mostrados en detalle en este trabajo por limitaciones de espacio, pero sí han sido explicadas cualitativa y conceptualmente en sección 4. El sistema resulta promisorio, especialmente a la luz de algunos resultados obtenidos de una simulación muy detallada a dos niveles, aplicado a un caso en el Condado de Orange, Estados Unidos.

A la luz de los resultados obtenidos (resumidos en sección 6), nos parece fundamental la característica de “gran cobertura” de vehículos como parte del sistema, lo cual se traduce en una alta tasa de respuesta, con tiempos de espera para llamadas generadas en tiempo real y sin ningún conocimiento previo, del orden de 10 minutos. Hoy día, en muchos sistemas *DRT* el usuario debe llamar con uno o dos días de antelación para recibir servicio. Además, los algoritmos de ruteo resultaron ser muy eficientes, y en los cuales la decisión incorpora variables como tiempo de espera, tiempo de viaje, impaciencia de usuarios a bordo debido a nuevas inserciones en la

ruta, costo de operador, etc. Además, una variable aleatoria fue incluida midiendo el número esperado de inserciones en cierta ruta, con el objeto de predecir de mejor manera el costo real de una inserción cualquiera y tomar decisiones basadas en una visión futura a partir del conocimiento del comportamiento del sistema en el tiempo presente.

Finalmente, y en relación con un posible impacto económico de este sistema en el caso de Estados Unidos, notar que con tasas de ocupación de 3 pax/veh. en promedio, se pueden negociar tarifas muy razonables que pudieran atraer demanda significativa desde el automóvil. Suponiendo que el costo por viaje es del orden de aquel asociado a un sistema *DRT* tradicional, es decir, del orden de US\$ 20 por viaje, podrían proponerse tarifas de  $20/3 \approx \$ 7.0$  por pasajero, y con algún subsidio estatal (25 % por ejemplo), una tarifa de US\$ 5 por un viaje de 20 a 25 km. Este valor es bien atractivo, considerando que un servicio de taxis en las mismas condiciones podría cobrar hasta US\$ 30 (asumiendo tasas de ocupación cercanas a la unidad). Sin duda que es necesario explorar más a fondo las ventajas y desventajas de un sistema como éste en el contexto latinoamericano, especialmente en relación con el impacto que podría tener en la demanda, sin embargo, no puede desconocerse que la idea es muy interesante y hasta este punto digna de ser estudiada y tomada en serio como parte de futuros planes de transporte.

## AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido parcialmente financiada por FONDECYT, Proyecto 1030700, y por el Núcleo Milenio "Sistemas Complejos de Ingeniería".

## REFERENCIAS

- Black, A. (1995) **Urban Mass Transportation Planning**, McGraw-Hill Series in Transportation, New York.
- Bodin, L., B. Golden, A. Assad y M. Ball (1983) Routing and scheduling of vehicles and crews. The state of the art, **Computers and Operations Research** 10, pp. 69-211.
- Cortés C.E. (2003) **High-Coverage Point-to-Point Transit (HCPPT): A new design concept and simulation-evaluation of operational schemes for future technological deployment**, Ph.D. Dissertation, University of California at Irvine.
- Cortés, C.E. and R. Jayakrishnan (2002) Design and Operational Concepts of a High Coverage Point-to-Point Transit System, **Transportation Research Record**, Vol. 1783, pp. 178-187.
- Dial, R.B. (1995) Autonomous dial-a-ride transit introductory overview, **Transportation Research**, Vol. 3C (5), pp. 261-275.
- Hickman, M. y K. Blume (2000) A method for scheduling integrated transit service. 8<sup>th</sup> **International Conference on Computer-Aided Scheduling of public Transport (CASPT)**, Berlin, Germany.

Jayakrishnan, R., C.E. Cortés, R. Lavanya and Laia Pagès (2003) Simulation of Urban Transportation Networks with Multiple Vehicle Classes and Services: Classifications, Functional Requirements and General-Purpose Modeling Schemes. **Proceedings of the 82<sup>th</sup> Transportation Research Board Annual Meeting**, Washington D.C, January 2003.

Jayakrishnan, R., H. Mahmassani y T-Y Hu (1994) An evaluation tool for advanced traffic information and management systems in urban networks, **Transportation Research, Vol. 2C, pp. 129-147.**

Jaw, J., A. Odoni, H. Psaraftis y N. Wilson (1986) A heuristic algorithm for the multi-vehicle advance request dial-a-ride problem with time windows, **Transportation Research, Vol. 20B(3), pp. 243-257.**

Liaw, C., White, C. y J. Bander (1996) A decision support system for the bimodal dial-a-ride problem, **IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics, Vol. 26, pp. 552-565.**

Mogridge M.J. (1987) A panacea for road congestion ? A riposte, **Traffic Engineering and Control, pp. 13 - 19.**

Newell, G.F. (1980) **Traffic flow on transportation networks**, MIT Press, Cambridge, Mass.

Oh, Jun-Seok, C.E. Cortés, R. Jayakrishnan y Der-Horn Lee (2000), Microscopic Simulation with Large-Network Path Dynamics for Advanced Traffic Management and Information Systems, **Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference on Applications of Advanced Technologies in Transportation Engineering**, Singapore.

Savelsbergh, M.W.P. y M. Sol (1995) The general pickup and delivery problem, **Transportation Science, Vol. 29(1), pp. 17-29.**

Stein, D.M. (1978) Scheduling dial-a-ride transportation systems, **Transportation Science, 12(3), pp. 232-249.**

Stone, J.R., A. Nalevanko y J. Tsai (1993) Assessment of software for computerized paratransit operations, **Transportation Research Record, Vol. 1378, pp. 1-9.**

Teal, R.F. (1993) Implications of technological developments for demand responsive transit, **Transportation Research Record, Vol.1390, pp. 33-42.**

Wilson, N.H.M., H. Weissberg y J. Hausser (1976) **Advanced dial-a-ride algorithms research project: Final report.** Report R76-20, Department of Civil Engineering, M.I.T., Cambridge, MA.

Wilson, N.H.M. y N.H. Colvin (1977) **Computer control of Rochester dial-a-ride system.** Report R77-31, Department of Civil Engineering, M.I.T., Cambridge, MA.