



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL

Microsimulación de Estrategias Planificadas de Operación para un Corredor de Transporte Público

MEMORIA PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO CIVIL

CHRISTIAN ANDRES ROMERO VASQUEZ

PROFESOR GUÍA:

CRISTIAN CORTES CARRILLO

MIEMBROS DE LA COMISION:

MARCELA MUNIZAGA MUÑOZ

RODRIGO FERNANDEZ AGUILERA

SANTIAGO DE CHILE

OCTUBRE 2008

RESUMEN

Cuando se analiza la demanda en algún sistema de transporte urbano, es posible notar que ésta no es necesariamente igual o de magnitudes semejantes en ambos sentidos de un tramo en particular. Por el lado de la oferta, la operación más común es fijar la frecuencia de acuerdo a la satisfacción de la demanda en el tramo más cargado y entregar la misma oferta en los tramos restantes del recorrido. Pero con esto se producen dos fenómenos que alejan la operación de un eventual óptimo: el primero tiene que ver con la sobreoferta existente en las zonas menos cargadas y el segundo corresponde a la imposibilidad de mejorar la calidad de servicio en el sentido prioritario pues la flota es fija en el corto plazo.

Dentro de la literatura existen numerosos esfuerzos por determinar expresiones analíticas que permitan optimizar el uso de la flota, tanto desde el punto de vista de los operadores como del de los usuarios. Ejemplo de ello es el sistema de bucles (*short turning*) que consiste en crear servicios cortos dentro del recorrido principal, y *deadheading*, en la que se impone que algunos vehículos, al llegar al terminal del sentido de mayor afluencia de pasajeros, regresen sin realizar servicio hasta el inicio del recorrido. Sin embargo, existen limitaciones al momento de estimar los beneficios de la aplicación de las estrategias, debido a restricciones de capacidad en vehículos, modelación de los tiempos de llegada de pasajeros y buses a los paraderos y operaciones detalladas de transferencia.

El presente trabajo busca evaluar la aplicación de las estrategias bucle y *deadheading* sobre un corredor de buses apoyándose en el uso de herramientas de microsimulación de tráfico, en situaciones difíciles de ser abordadas por una formulación puramente analítica. Se utilizará para tal efecto la aplicación MISTRANSIT descrita en Fernández *et al* (2007), y el microsimulador comercial PARAMICS. Se cuenta con una red calibrada del corredor segregado de Avenida Pajaritos en la ciudad de Santiago de Chile sobre la cual se realizará la simulación de los distintos escenarios.

El aporte de este trabajo consiste en incorporar a la aplicación MISTRANSIT funcionalidades que aumentan el nivel de análisis de operación de transporte público, en particular para la evaluación de estrategias de asignación de flota. Por otro lado, a partir de los resultados obtenidos se aprecia que a la hora de estimar beneficios existen variables no incluidas en la modelación analítica que son significativas, como por ejemplo la espera extra provocada por buses circulando a capacidad.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer a mi familia por apoyarme prácticamente en todos mis emprendimientos, en especial por estos 7 años de gran esfuerzo emocional y económico. Aunque me digan que es para mí, esto también es por y para ustedes. Gracias por todo, los amo !

A Muriel Velasco, por enseñarme a ver con el corazón y por convertirse en lo más bello de mi vida, gracias por tu alegría, compañía y por sobre todo tu amor. TE AMO PRECIOSA

A mis compañeros de especialidad y prontamente de profesión, por sus grandes enseñanzas, correcciones, happy hours y demases. En especial para Alejandro Tirachini y Vanessa Burgos por su paciencia en las primeras horas de este trabajo.

A mis profesor guía Cristián Cortés, y profesores de comisión Marcela Munizaga y Rodrigo Fernández por la oportunidad de desarrollar este trabajo y por la deferencia y comprensión mostradas a la hora de las preguntas.

Finalmente, a mis amigos Serguey Maximov, Alejandro Aguayo, David Solans ,Sergio Duarte, Jaime Vergaray, Hernán Castro, Cristian Aravena y Álvaro Salinas por los innumerables momentos de conversación y alegría.

Para ustedes, Ali y Lucho

Sumario

<i>Sumario</i>	4
1. <i>Introducción</i>	5
2. <i>Revisión Bibliográfica</i>	7
2.1 Microsimulación	7
2.2 Desarrollo de Estrategias	9
2.3 Especificación del Tiempo de Espera	11
3. <i>Descripción del Software Utilizado</i>	16
3.1 PARAMICS	16
3.2 MISTRANSIT	17
3.3 Interacción PARAMICS-MISTRANSIT	19
3.4 Implementación de Nuevas Funcionalidades	21
3.5 Implementación de Estrategias de Asignación de Flota	28
4. <i>Aplicaciones</i>	33
4.1 Red de microsimulación del corredor Pajaritos	33
4.2 Descripción General de Escenarios de Simulación	35
4.3 Escenario 1 - Deadheading	36
4.4 Escenario 2 - Bucle en extremo del corredor	45
5. <i>Conclusiones y Comentarios</i>	53
6. <i>Bibliografía y Referencias</i>	56

1. Introducción

Cuando se analiza la demanda en algún sistema de transporte urbano, es posible notar que ésta no es necesariamente igual o de magnitudes semejantes en ambos sentidos de un tramo en particular. Más aún, se observa que por ejemplo el período de punta mañana, la cantidad de viajes hacia los centros de actividades de las ciudades son mayores que los que se realizan en el sentido contrario.

Por el lado de la oferta, la operación más común es fijar la frecuencia de acuerdo a la satisfacción de la demanda en el tramo más cargado y entregar la misma oferta en los tramos restantes del recorrido. Pero con esto se producen dos fenómenos que alejan la operación de un eventual óptimo: el primero tiene que ver con la sobreoferta existente en las zonas menos cargadas y el segundo corresponde a la imposibilidad de mejorar la calidad de servicio en el sentido prioritario pues la flota es fija en el corto plazo.

Estos fenómenos son algunos de los que incentivan la búsqueda de estrategias de asignación de flota, las que al aplicarse pueden permitir mejorar y/o mantener la calidad del servicio mediante una reducción de flota y/o reasignación de los vehículos.

Buscando este objetivo, dentro de la literatura existen numerosos esfuerzos por determinar expresiones analíticas que permitan optimizar el diseño de las estrategias, tanto desde el punto de vista de los operadores como del de los usuarios. Ejemplo de ello es el sistema de bucles (*short turning*) que consiste en crear servicios cortos dentro del recorrido principal, a fin de generar una mayor oferta en la zona de más carga de pasajeros del corredor. Por otro lado está la estrategia *deadheading*, en la que se impone que algunos vehículos, al llegar al terminal del sentido de mayor afluencia de pasajeros, regresen sin realizar servicio hasta el inicio del recorrido, con tal de aumentar la frecuencia

en la dirección más solicitada gracias a una reducción en el tiempo de ciclo. Ambas estrategias han sido desarrolladas en varios trabajos, los que se encuentran bien descritos en Tirachini (2007).

Sin embargo al momento de estimar los beneficios de la aplicación de las estrategias, los autores se enfrentan con diversas limitaciones, como por ejemplo el cálculo correcto de forma analítica de tiempos de espera en paraderos, debido a restricciones de capacidad en vehículos, modelación de los tiempos de llegada de pasajeros y buses a los paraderos y operaciones detalladas de transferencia.

El presente trabajo busca evaluar la aplicación de las estrategias bucle y *deadheading* sobre un corredor de buses apoyándose en el uso de herramientas de microsimulación de tráfico, en situaciones difíciles de ser abordadas por una formulación puramente analítica. En este caso se utilizará la aplicación MISTRANSIT, descrita y desarrollada en Fernández *et al* (2007), la cual a través del microsimulador comercial PARAMICS¹ permite una modelación realista y detallada de las interacciones entre pasajeros y buses en los paraderos.

Para ello se cuenta con una red calibrada del corredor segregado de Avenida Pajaritos en la ciudad de Santiago de Chile (Didier 2008), sobre la cual se realizará la simulación de los distintos escenarios. De esta forma se busca superar las limitaciones analíticas mencionadas anteriormente y estimar de mejor forma la aplicación de las estrategias de asignación de flota.

¹ En adelante el entorno de microsimulación será llamado MISTRANSIT/PARAMICS

2. Revisión Bibliográfica

Para efectos prácticos, la revisión se ha dividido en tres grupos de análisis. El primero corresponde a microsimulación, el segundo al desarrollo de estrategias y el último a las especificaciones del tiempo de espera.

2.1 Microsimulación

La simulación microscópica de tráfico (desde aquí microsimulación) nació de la necesidad de los modeladores para evaluar el comportamiento de los distintos componentes del tráfico, como lo son los vehículos, las calles, las intersecciones y sus regulaciones. En el último tiempo se han desarrollado plataformas que permiten realizar tales tareas, con énfasis al movimiento de automóviles., pero que poco ayudan a la planificación de otros componentes del sistema de transporte como lo es el transporte público. Ejemplos de software comerciales son VISSIM, AIMSUN/2, CORSIM, DRACULA y PARAMICS.

La operación de transporte público se visualiza como una de las tantas restricciones que poseen los automovilistas para su movimiento y se modela generalmente como vehículos más grandes, impidiendo el detalle de elementos cruciales en el sistema como lo son las frecuencias o la interacción entre pasajeros y buses en los paraderos. Por ejemplo, de los simuladores mencionados anteriormente, sólo PARAMICS y VISSIM contemplan la capacidad y ocupación de los vehículos como parámetros de la modelación, dejando cerrada la posibilidad de manejar situaciones de hacinamiento en los buses para el resto del software. En AIMSUN/2 los tiempos de detención siguen una distribución normal, lo cual incide en que no se toma en cuenta la interacción entre pasajeros y vehículos de transporte público haciendo imposible la medición de niveles de servicio del sistema, como por ejemplo tiempos de espera o longitudes de cola. En DRACULA, el tiempo de detención en paraderos

se calcula como un promedio ponderado entre la cantidad de pasajeros que pagan en efectivo y la que lo hace a través de pases o tarjetas, más un tiempo muerto por concepto de apertura y cierre de puertas. Se supone entonces que la bajada de pasajeros no es determinante a la hora de estimar los tiempos de servicio en paraderos, lo cual no resulta realista especialmente en casos en que este movimiento es más importante que la subida. PARAMICS y VISSIM por su parte si toman en cuenta la bajada, que se obtiene de un porcentaje de la tasa de ocupación del vehículo.

En Cortes et al (2005) se presenta una revisión más detallada de las características de los software comerciales existentes, en los que se recalca además de las limitaciones mencionadas anteriormente, la inflexibilidad para simular vías exclusivas o segregadas, que frecuentemente se modelan “engañando” al software utilizando las estructuras que se proveen. Este último enfoque ha sido aplicado para simular sistemas tranviarios o de buses guiados, por mencionar algunos usos. Otra revisión de las capacidades de algunos simuladores se puede encontrar en US-DOT (2006), donde se analiza especialmente la disponibilidad para modelar elementos de la red o diferentes escenarios de operación del sistema de transporte, como por ejemplo accidentes o políticas de gestión.

Existe otra forma para superar las restricciones de los simuladores, y que corresponde a la utilización de módulos complementarios al software a través de las APIs o interfaces de programación de aplicaciones, las que pueden ser integrados al programa principal. Estas APIs son implementadas mediante grupos de funciones que permiten manejar ciertos elementos del proceso de simulación. La mayoría del software comercial (incluyendo PARAMICS, VISSIM y AIMSUM/2) provee series de funciones API para los usuarios.

Este proceso es descrito en Chiu *et al* (2003), en donde se elije PARAMICS pues según los autores ofrece el suficiente detalle en la modelación para muchos

componentes del sistema de transporte, como las características geométricas, de los conductores, vehículos y las interacciones entre ellos. El proceso es el siguiente: después de iniciarse la simulación, algunos elementos básicos en la misma son actualizados en cada intervalo temporal. Si un módulo API está involucrado en la situación, podría trabajar en cada intervalo o ser llamado por un evento específico o en un tiempo determinado.

Un ejemplo de API se presenta en Fernández *et al* (2007) bajo el nombre de MISTRANSIT (Microscopic Simulation of TRANSIT operations). Esta aplicación es desarrollada para trabajar junto a PARAMICS y tiene como principales características la incorporación de los pasajeros como elementos individuales, la inclusión de modelos específicos para la interacción en paraderos de vehículos y pasajeros. Los autores demuestran que es posible cuantificar las ventajas de aplicar una estrategia de retención de vehículos en paraderos (*holding*) o la capacidad de una vía segregada de buses, que son difíciles de representar en microsimuladores convencionales.

2.2 Desarrollo de Estrategias

Las estrategias planificadas de asignación de flota corresponden a la definición de parámetros de servicio para la operación de transporte público, en especial de la frecuencia, de forma tal de ajustarse a los peaks de demanda existentes a lo largo del día. Un primer acercamiento a tal ajuste lo realiza Furth (1985), quien a partir de la observación de que ciertas rutas presentan desbalance en la demanda según el sentido de operación, plantea que ciertos buses que sirven el sentido más cargado vuelvan a su terminal de origen sin efectuar servicio. La reducción en el tiempo de ciclo medio permite reducir el tamaño de la flota necesaria para cumplir con las exigencias de la demanda. El autor denomina a esta estrategia como *deadheading* y con ella resuelve dos tipos de problemas, la búsqueda de la flota mínima dadas restricciones de servicio

(intervalos máximos) y la minimización del tiempo de espera sujeto a tamaño de flota fijo. En el primer caso, la demanda se encuentra implícita pues los intervalos máximos deben ser tales que la capacidad de transporte del corredor no se vea sobrepasada.

Anterior a este trabajo, Ceder y Stern (1981) abordan la utilización de la estrategia, para lo cual desarrollan heurísticas que buscan soluciones computacionales para el cumplimiento de una programación exógena definida manualmente, a fin de minimizar el tamaño de la flota. Para los autores, la necesidad de insertar viajes en vacío, más allá de ajustar la oferta a la demanda radica en una mejor utilización de los terminales y de la transferencia por mantención de los vehículos desde y hacia los talleres.

En Tirachini y Cortes (2007) se desarrollan dos modelos de *deadheading*, uno que se hace cargo de datos de demanda agregados como promedios del corredor y otro que considera conocida la matriz de origen destino al interior del tramo (desagregado). Para este último modelo, los autores generan un algoritmo para calcular las estaciones óptimas de inicio y fin de la estrategia, integrando de esta forma la necesaria definición del tramo donde se aplicará el *deadheading*. Además, encuentran a través de soluciones analíticas y numéricas que es más probable tener beneficios en el tiempo de viaje que por tiempo de espera. La aplicación desarrollada arrojó beneficios totales menores al 5 % en todos los casos, cuando se tiene un tamaño de flota fijo pero si es posible la reducción de flota, los operadores observan beneficios de aproximadamente 10 %.

Otro escenario presente en los sistemas de transporte público ocurre cuando existen patrones de demanda en corredores que evidencian una alta carga de pasajeros solamente en ciertos tramos del mismo, haciendo deseable cubrir esa demanda con servicios cortos. Esta estrategia es conocida como *short-*

turning o bucle, y en contraste con deadheading, realiza servicio en ambos sentidos de la ruta pero solamente entre ciertos nodos del recorrido.

Delle Site y Fillippi (1997) desarrollan un modelo de optimización de flota mediante la aplicación de bucles y la consideración de tipos de vehículos variables. En el trabajo mencionado las variables de decisión corresponden a los nodos de inicio/fin del bucle, el tamaño de la flota y las frecuencias para cada línea. La optimización corresponde a maximizar el beneficio social, que es definido como la diferencia entre los beneficios de los usuarios y los costos de operadores no cubiertos por la tarifa. La solución a los modelos planteados es numérica debido a la complejidad de los mismos. Con una aplicación comparan el funcionamiento de la estrategia con respecto a la operación normal y sus resultados más destacables son que los bucles deben ser aplicados solo en períodos con peaks de demanda y que los usuarios se ven beneficiados en sobre un 40% en tiempo de espera promedio.

Siguiendo la línea de Delle Site y Filippi, Tirachini y Cortes (2007) desarrollan dos modelos de bucles con información desagregada por paraderos, dependiendo si el tamaño de flota es fijo o variable. La función objetivo de ambos problemas corresponde a la suma de costos generalizados de usuarios y de operadores. Mediante una aplicación concluyen que para tamaños de flota fijo se obtienen beneficios de aproximadamente un 20% para los usuarios permitiendo a los operadores reacomodar la flota disponible a los patrones de demanda y a la vez mejorar el nivel de servicio.

2.3 Especificación del Tiempo de Espera

El tiempo de espera promedio (AWT por *Average Waiting Time*) en un paradero de transporte público está relacionado directamente a la distribución de llegadas de pasajeros y a la distribución de las desviaciones en los arribos de

los buses con respecto al horario preestablecido. El enfoque más común es considerar que los pasajeros arriban de manera aleatoria, independiente de los horarios de llegada de los buses y que estos tienen capacidad suficiente para que todos los pasajeros puedan subirse. Bajo esta premisa Welding (1957) deriva el AWT como:

$$AWT = \frac{H}{2} [1 + C_v^2] \quad (2.1)$$

Dónde H es el intervalo promedio entre llegadas de buses y C_v es el coeficiente de variación de los intervalos².

A partir de esta ecuación, se puede comprobar que la espera promedio es mayor que la mitad del intervalo pues muchos pasajeros llegan al paradero durante períodos largos donde el tiempo de espera es claramente mayor que la mitad del intervalo promedio, y pocos pasajeros arriban en períodos cortos donde la espera es menor. Entonces el tiempo de espera promedio aumenta mientras menos uniformes sean los intervalos de llegada de los buses a los paraderos, situación que se ve reflejada en el aumento del valor del coeficiente de variación.

La hipótesis de que los pasajeros llegan a los paraderos de manera aleatoria es corroborada por Danas (1980), quien a partir de observaciones en dos paradas de buses de Londres determina patrones de arribo que se comportan como un proceso Poisson. Estos patrones según el autor poseen dos tipos de variación, una de corte macroscópico, con tiempos de referencia mayores a cinco minutos, y otra de tipo microscópico, con menos de un minuto.

En el primer nivel, la variación del flujo de pasajeros a largo plazo depende principalmente del período del día, presentando los valores más altos según

² Definido como el cociente entre la desviación estándar y el promedio

las horas punta. En el segundo, se evidencia que los arribos varían en torno a las tasas macroscópicas de llegada de pasajeros, a pesar de que estas sean estables. Estas variaciones, según lo expresado por Danas, se deben al hecho de que el arribo de pasajeros es aproximadamente un evento aleatorio.

Por otro lado, el mismo autor estudia el efecto de un bus lleno en el tiempo de espera. Tomando como referencia a Welding (ecuación 2.1) y a partir de los datos recogidos, encuentra que el tiempo de espera de los pasajeros en el paradero son 23 y 49% mayores que los estimados con la expresión mencionada, que supone que los pasajeros abordan el primer bus.

Finalmente, el mismo autor plantea que los intervalos de los buses siguen una distribución exponencial, por lo que el evento de llegada a los paraderos de los vehículos es también un proceso Poisson.

Otro enfoque para la especificación del tiempo de espera es la consideración de dos grupos de pasajeros y por ende de dos modelos distintos. El primer grupo, llamado “independiente de horarios” contempla a los pasajeros que arriban al paradero de manera aleatoria, sin tener consideración o conocimiento de los horarios de los buses y el segundo grupo “dependiente de horarios” que conocen las llegadas de los buses y llegan al paradero considerando esta situación.

En Bowman y Turnquist (1980) se plantea que el grupo independiente arriba de forma aleatoria y que el grupo dependiente está bien representado por una derivación continua del modelo Logit, en el cual la elección es el tiempo de llegada.

En la misma línea, Luethi *et al* (2006) plantean que las llegadas al paradero del grupo dependiente se comportan bajo una distribución Johnson S_B y por ende

el proceso general de arribo se construye como una superposición entre llegadas uniformes (grupo independiente) y llegadas Johnson S_B . Esta hipótesis es realizada a partir de datos recolectados en 28 paradas de la red de transporte público de Zurich. Además, se plantea en el mismo trabajo que el tiempo promedio de espera con respecto a los intervalos puede ser modelado con una función logarítmica.

Con respecto a la determinación del intervalo crítico en donde se separa el comportamiento característico de los usuarios independientes del horario con los dependientes, en Seddon y Day (1974) se plantea que para servicios de alta frecuencia, que para los autores corresponde a intervalos de a lo más 10 minutos, los usuarios arriban de forma aleatoria a los paraderos. Según Danas, esta afirmación no se cumplió para todas las observaciones, y en las que es aplicable, las medias de intervalos críticos varían entre 3 y 7 minutos. Esta situación se debe en gran medida a la periodización utilizada por el autor, en que se aprecia una varianza en la tasa de arribos de pasajeros.

Considerando la capacidad de los buses, Oldfield y Bly (1988) plantean que en corredores de alta demanda, el tiempo de espera depende además del intervalo del factor de carga ϕ , definido como sigue:

$$\phi = \frac{q}{C} H \quad (2.2)$$

Donde q es la carga del bus, C es su capacidad y H es el intervalo. Luego, se define el tiempo de espera de forma multiplicativa en que una parte depende exclusivamente del intervalo y otra parte del factor de carga. Esta última incluye un término de saturación, con el cual se incorpora el aumento más que proporcional que presenta el tiempo de espera cuando la carga dentro del vehículo se acerca al nivel crítico:

$$WT(f, \phi) = \frac{H}{2} \left[1 - \left(\frac{\phi}{s} \right)^\gamma \right]^{-1} \quad (2.3)$$

donde γ es un parámetro que fue fijado por los autores por simulación en 2.5 para tasas de ocupación baja y 5 para buses llenos. Como se puede ver, esta expresión no considera directamente ningún grado de variabilidad en los intervalos, pero se puede representar que los buses lleguen regularmente (EWT=H/2) o que lleguen bajo un proceso Poisson (EWT=H), esto último multiplicando la ecuación anterior por 2.

3. Descripción del Software Utilizado

El objetivo principal de este capítulo es describir las herramientas computacionales que se desarrollan y adoptan en este trabajo. En primer lugar se analiza el funcionamiento del simulador de tráfico PARAMICS y luego su integración con la aplicación MISTRANSIT. Finalmente, se presenta a el proceso de elaboración de los experimentos de simulación de las estrategias de asignación de flota, a partir de las modificaciones realizadas al módulo original de MISTRANSIT y la incorporación de nuevas funcionalidades necesarias para la programación de los algoritmos que permitan la modelación de las situaciones a simular.

3.1 PARAMICS

PARAMICS (PARAllel MICroscopic Simulation) es un software comercial que permite la modelación microscópica del movimiento vehicular, en redes urbanas e interurbanas. El programa cuenta con diversos módulos, de los cuales el más representativo es *Modeller*, el cual es responsable tanto de la visualización de la red (dos y tres dimensiones) como de la simulación del movimiento vehicular. Para realizar ambas tareas, se le deben entregar la topología y topografía de la red, las matrices de demandas de viajes, características de los vehículos y los parámetros para los modelos.

El módulo *Programmer* es una librería de funciones que entrega acceso a los datos de la simulación en tiempo real, permitiendo la lectura y escritura de información de una gran variedad de parámetros del programa. Existen 4 tipos de funciones: *override*, *extend*, *get*, *set*.

Las funciones de tipo *override* (QPO) permiten reemplazar algoritmos y rutinas originales del modelo, como por ejemplo el modelo de seguimiento vehicular. Por su parte, las funciones *extend* (QPX) son capaces de agregar nuevas funcionalidades al programa, y pueden ser llamadas a ejecución por diversos eventos como la entrada de un vehículo a la red o el término de un paso de la simulación. Finalmente las funciones *get* (QPG) y *set* (QPS) permiten respectivamente obtener y entregar datos de los diversos objetos que componen la simulación.

Con la batería de funciones otorgada por *Programmer*, es posible crear aplicaciones que sean capaces de manejar diversas opciones del simulador, partiendo desde cambios a las reglas de cambio de pista hasta llega incluso a generar niveles paralelos de análisis. Este tipo de desarrollo es conocido como API

3.2 MISTRANSIT

MISTRANSIT es una aplicación desarrollada en la división de transporte de la Universidad de Chile con el fin de aumentar las capacidades de los microsimuladores comerciales para el análisis de la operación de transporte público de superficie. Este módulo es presentado en Burgos (2006) y consiste básicamente en la incorporación de tres aspectos: el primero corresponde a la mejora en la caracterización de los vehículos de transporte público, el segundo y tercer aspecto dan cuenta respectivamente de la inclusión de los pasajeros como nuevos elementos de la simulación y de modelos específicos de interacción de estos con los buses.

Este último aspecto se materializa en la definición de dos tipos de pasajeros, dependiendo del medio de acceso al sistema: un primer grupo consiste en los usuarios que llegan directamente a los paraderos (P1) y otro grupo

corresponde a los que vienen a bordo de los buses al entrar en la red (P2). Cada pasajero cuenta con un identificador (ID) , su tiempo de llegada al paradero (para el grupo P1) , bus en el que ingresa a la red (para el grupo P2), el set de líneas comunes, la cantidad de trasbordos que realizará y la secuencia de paraderos desde su origen hacia su destino. Además, se incluyen parámetros individuales para el modelo de transferencia de pasajeros, como por ejemplo los tiempos de subida / bajada del bus.

Con respecto a los buses, cada vehículo es descrito por su número identificador, el servicio (línea) al cual pertenece, su tiempo de entrada a la red, número y función de puertas, su capacidad, parámetros del modelo de transferencia y cantidad de pasajeros que entran a la red abordo y se mantienen ocupando una plaza hasta el final de la simulación (tasa de ocupación permanente). Estos pasajeros no están directamente involucrados en la simulación y por ende no son definidos en detalle, pues solo afectan la tasa de ocupación.

Finalmente, MISTRANSIT mantiene el número de paradas en la red, la identificación y ubicación de cada una, la descripción de los servicios y su secuencia de paradas asociada.

Como parte de las estructuras de datos, las estadísticas asociadas a pasajeros y vehículos son almacenadas para ciertos eventos relevantes de la simulación. Las estructuras de buses y pasajeros también almacenan variables que permiten definir el estado de cada elemento en cada instante de la simulación. Por ejemplo, para los buses los estados pueden ser: en movimiento, detenido en una parada, fuera de la red o cualquier otro. Por su parte, los pasajeros pueden estar en el paradero de origen, en el destino, en algún paradero de trasbordo o a bordo de algún bus.

MISTRANSIT está escrito en lenguaje de programación C, y utiliza algunas de las funciones disponibles del módulo *Programmer* de PARAMICS. Estas funciones permiten el manejo externo del simulador en tiempo real, ya sea para obtener información, para modificar datos o para intervenir los códigos internos del programa, en particular los modelos de comportamiento vehicular. Luego de realizar el proceso de compilación del código, se genera un archivo de librerías dinámicas (.dll) el cual debe ser cargado en la red que requiera las nuevas funcionalidades.

3.3 Interacción PARAMICS-MISTRANSIT

Tras la carga de una red en PARAMICS se leen los archivos de entrada, cuyos datos son almacenados en los correspondientes arreglos de estructuras de MISTRANSIT. Luego, y de acuerdo con los eventos ocurridos en el simulador, se activan y ejecutan las funciones correspondientes las que reciben información de PARAMICS, realizan sus procesos y entregan al programa entradas para los siguientes pasos de la simulación, como se puede ver en el siguiente cuadro:

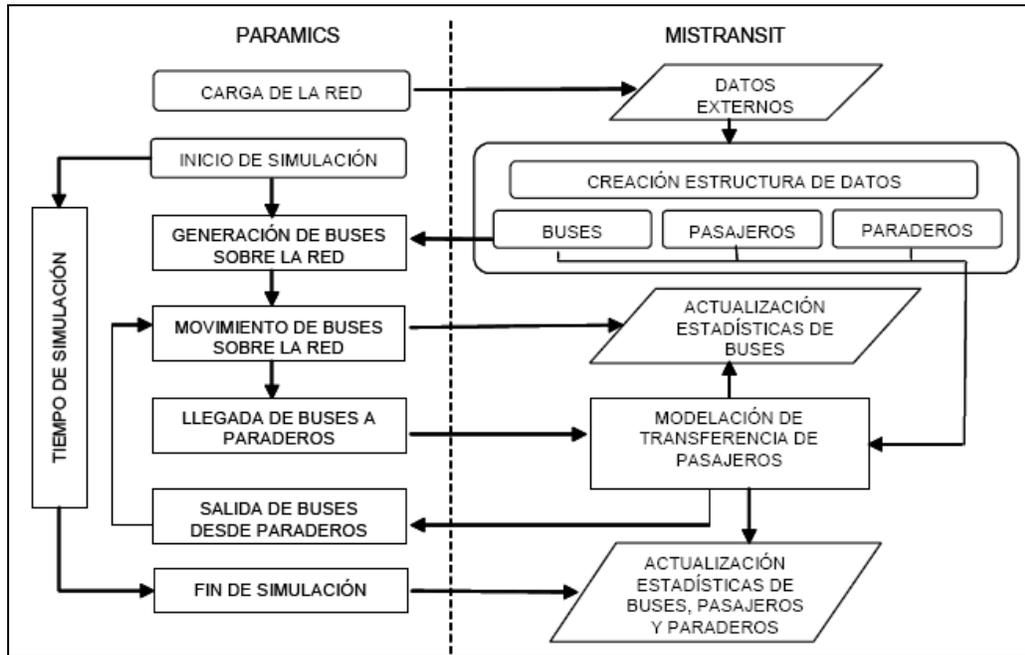


Figura 3-1: Interacción MISTRANSIT / PARAMICS
Fuente: Burgos (2006)

Cabe destacar que los objetos sobre los cuales MISTRANSIT tiene control absoluto son los pasajeros. En el caso de los buses, PARAMICS controla el movimiento e interacción con los demás elementos que configuran la simulación, mientras que MISTRANSIT recopila las estadísticas y almacena las características de cada vehículo de transporte público. El nexo entre ambos niveles de simulación se realiza gracias a que *Programmer* permite asociar la identificación de un bus en PARAMICS con el bus correspondiente de MISTRANSIT, asignando a este último las estadísticas que entrega el primero. Aún cuando PARAMICS controle el totalmente movimiento de los buses a través de la red, existen dos eventos en los cuales MISTRANSIT posee el control del vehículo, que corresponden al ingreso a la red (definido por un itinerario o aleatorio) y el tiempo de detención en paraderos, que depende en gran manera de las demoras por transferencia de pasajeros (modelos TSP).

En caso de ser necesario para el desarrollo de un experimento en particular, es posible aumentar el control que posee MISTRANSIT sobre el movimiento de los buses, a través de las funciones incluidas en el módulo *Programmer*. Así por ejemplo se puede modelar una estrategia de mantención de intervalos en tiempo real (holding) modificando las velocidades o ejecutando detenciones arbitrarias de vehículos en algún punto de su ruta.

3.4 Implementación de Nuevas Funcionalidades

3.4.1 Diferenciación Bus-Vehículo / Bus-Servicio

El módulo original de MISTRANSIT guarda la información correspondiente a buses en una estructura de datos ad-hoc denominada **bus**, la cual contiene características físicas del vehículo, como por ejemplo la capacidad o el número de puertas, y las características operacionales del mismo, entre ellas el itinerario de paradas o los tiempos de detención en paraderos.

Cuando se realiza la simulación, MISTRANSIT recopila la información del movimiento de los buses desde PARAMICS y luego ejecuta sus propios modelos, los que devuelven el control del bus al simulador pero a la vez almacenan los datos en los distintos campos de la estructura bus. Una vez que el vehículo arriba a su destino (por ejemplo el paradero final), se calculan los totales de la operación y el bus es eliminado de la simulación.

Para efectos de este trabajo esta construcción no es adecuada, pues para incorporar en la simulación las estrategias de asignación de flota se requiere diferenciar los conceptos de bus-vehículo y bus-servicio. Así, se puede asignar distintos servicios de una línea a un vehículo en particular, de acuerdo con sus distribuciones en las cabeceras o puntos reguladores de frecuencia. Es por ello que se define una nueva estructura, denominada **servicio** que contiene la información operacional del vehículo, como por ejemplo los tiempos de

recorrido, tasas de ocupación, demoras por detenciones, perfil de carga, etc. Por otra parte, las características físicas de los vehículos se mantienen dentro la estructura de datos original.

En la práctica, una vez que corresponde lanzar un servicio, el programa le asigna el primer bus que se encuentra disponible en el cabezal correspondiente (se crea una fila FIFO de vehículos) y PARAMICS procede con la simulación hasta que el servicio concluye en el terminal. En ese instante, el bus que estaba asignado al servicio recientemente finalizado se vuelve disponible (entra a la fila) para eventualmente realizar un nuevo viaje desde el punto regulador de frecuencia.

3.4.2 Retención por disponibilidad

En situaciones normales de operación, se puede dar el caso que una salida programada de un servicio no pueda ser asignada a algún bus pues el terminal de la línea correspondiente se encuentra sin vehículos disponibles, ya sea por desperfectos técnicos o por demora en recorrido. Es por ello que se incorporó a MISTRANSIT un algoritmo que comprueba la factibilidad de enviar a la calle un servicio determinado de acuerdo con la disponibilidad de vehículos.

El funcionamiento del proceso se inicia en el instante en que debiese partir el servicio, momento en el cual el programa verifica que existan buses de la línea respectiva en el terminal. Si la comprobación es correcta, se asigna el servicio al primer bus que se encuentra en la fila de salida (ver sección 4.1.1) y éste sale a recorrido. En cambio si no existen buses, el horario de salida es postergado en una cantidad fija de tiempo a la espera de que un servicio anterior finalice y deje disponible el bus. En caso de no cumplirse nuevamente esta condición, la salida es postergada cuantas veces sea necesario hasta que un bus llegue al terminal.

3.4.3 Retención por intervalos

Para efectos de entregar intervalos de salida uniformes, se ha implementado un sistema de retención de vehículos (*holding*) en los paraderos de cabecera de cada línea. Este algoritmo se inicia cada vez que se despacha un vehículo y calcula la diferencia entre su tiempo de salida del terminal y el tiempo de reinicio de servicio del bus inmediatamente anterior desde el siguiente paradero. Entonces si la diferencia es mayor que un intervalo mínimo definido previamente, el vehículo programado para salir es lanzado a la red. Si esta diferencia es menor, el servicio es postergado en una magnitud que corresponde al tiempo que le resta para cumplir con el intervalo mínimo.

En caso de ser necesario, un servicio puede ser postergado cuantas veces sea necesario según la demora que el vehículo antecesor enfrente por concepto de transferencia de pasajeros. Además, está cubierta la posibilidad de retrasar múltiples salidas si es que corresponde hacerlo a fin de mantener los intervalos mínimos. Cabe destacar que este algoritmo es complementario con la retención por disponibilidad, por lo que si corresponde, un servicio puede ser postergado por ambos motivos antes de su salida a recorrido.

3.4.4 Llegada de pasajeros a paraderos

Para el desarrollo del presente trabajo es fundamental realizar un tratamiento adecuado de la modelación de los patrones de arribo de los pasajeros a los paraderos de transporte público, a fin de representar de forma fidedigna las características que poseen en el contexto de la operación de paraderos. Incorporar la modelación de pasajeros permite mejorar las estimaciones de tiempos de espera y de viaje, pues es posible calcular estos indicadores para cada usuario del corredor y por ende se conoce en detalle el comportamiento en cada parada de la red. De esta forma, se agrega un nuevo nivel de análisis

de la aplicación de estrategias de asignación de flota, que en los modelos analíticos está limitado a resultados globales (totales de red)

Como dato de entrada es necesario entregar al programa una matriz origen destino de pasajeros al interior de la red. El siguiente paso es la modelación de los tiempos de llegada de los pasajeros, para lo cual se ha considerado cuatro tipos de formulaciones que representan distintos alcances al fenómeno analizado. La notación utilizada en las expresiones que siguen es la siguiente:

t_{ip} : Tiempo de llegada del pasajero i al paradero p (su paradero de origen)

U : Variable Aleatoria Uniforme con valor entre 0 y 1

Determinístico Regular

$$t_{ip} = t_{(i-1)p} + \frac{1}{N_p} \quad (3.1)$$

N_p : Número de pasajeros cuyo paradero de origen es p

Aleatorio Uniforme

$$t_{ip} = t_{(i-1)p} + a + U \cdot (b - a + 1) \quad (3.2)$$

$[a, b]$: Intervalo de aceptación de intervalos de llegadas

Aleatorio Poisson (Exponencial Negativa)

$$t_{ip} = t_{(i-1)p} - \frac{1}{\lambda_p} \exp(U) \quad (3.3)$$

λ_p : Tasa de llegada de pasajeros al paradero p

Aleatorio Cowan M3 (Cowan 1975)

Esta formulación permite modelar las llegadas de pasajeros en pelotones. La proporción de pasajeros que arriban a una tasa constante τ se define como θ mientras que $(1-\theta)$ son los pasajeros que llegan con intervalos mayores que τ .

$$t_{ip} = t_{(i-1)p} + \frac{\tau_p - Ln\left(\frac{1 - \max(U, \theta_p)}{1 - \theta_p}\right)}{\gamma_p} \quad (3.4)$$

Luego del cálculo del tiempo de llegada, se procede a asignar el destino del pasajero creado. Este proceso se realiza de forma aleatoria uniforme, considerando que el paradero que tiene mayores probabilidades de ser el destino del pasajero es el que mayor demanda tenga desde el paradero origen. Este proceso tiene como restricción la cantidad de usuarios totales que ingresan y/o egresan a la red en cada una de las paradas existentes y que está definida a través de la matriz OD.

3.4.5 Tiempo de servicio en paraderos

Uno de los elementos vitales en el análisis de la operación de un sistema de transporte público es la interacción entre pasajeros y buses. Este fenómeno es el factor principal que determina los tiempos de detención de los vehículos por concepto de subida y/o bajada de pasajeros en las estaciones. En Burgos (2006) se utiliza el modelo calibrado por Gibson *et al* (1997) para paraderos formales:

$$TSP = \beta_0 + \beta_1 \delta_1 + \max_{p=puerta} \left\{ (\beta_2 + \beta_3 \delta_1 + \beta_4 \delta_2) S_p + (\beta_5 e^{-\beta_6 B_p} + \beta_7 \delta_3) B_p \right\} \quad (3.5)$$

Donde:

S_p, B_p : Cantidad de pasajeros que suben y bajan respectivamente por puerta p

δ_1 : Variable binaria que indica si el andén está congestionado

δ_2 : Variable binaria que indica si al bus suben 4 o más pasajeros

δ_3 : Variable binaria que indica si el bus no tiene capacidad disponible (*está lleno*)

β_0 y β_1 : Parámetros que hacen referencia al tiempo muerto por detención

$\beta_2, \beta_3, \beta_4$: Tiempos de subida por pasajero

β_5, β_7 : Tiempos de bajada por pasajero

β_6 : Parámetro de la función exponencial

Los valores de estos parámetros se presentan en la tabla 3-1:

Tabla 3-1: Parámetros modelo TSP Gibson et al (1997)
Paraderos Formales

Parámetro	Valor	Unidad
β_0	0	s
β_1	2.34	s
β_2	2.99	s / pax
β_3	0.4	s / pax
β_4	0.43	s / pax
β_5	2	s / pax
β_6	0.035	pax ⁻¹
β_7	1.14	s / pax

Fuente: Gibson et al (1997)

Adicionalmente, a este modelo se le incorporó la opción de calcular el TSP mediante la formulación calibrada en Fernández *et al* (2008) en el contexto de la operación de Transantiago. La importancia de este modelo es que incorpora las nuevas características operacionales existentes debido al nuevo material rodante, la formalización de las paradas y el cambio del método de cobro. En el trabajo mencionado se plantea el siguiente modelo

$$TSP = \beta_0 + \max_{p=\text{puerta}} \{(\beta_1 + \beta_2 \delta_1)S_p + (\beta_3 - \beta_4 \delta_2)B_p\} \quad (3.6)$$

Donde:

S_p, B_p : Cantidad de pasajeros que suben y bajan respectivamente por puerta p

δ_1 : Variable binaria que indica si suben 40 o más pasajeros (caso troncal)³

δ_2 : Variable binaria que indica si bajan 15 o más pasajeros (caso troncal)

β_0 : Tiempo muerto por detención

β_2, β_3 : Tiempos marginales de subida por pasajero

β_3, β_4 : Tiempos marginales de bajada por pasajero

Una característica importante de este modelo es que el parámetro que acompaña a la variable δ_2 es negativo. Según los autores esto se debe a que mientras más pasajeros descienden en el paradero, el proceso de bajada se acelera pues existe presión para bajar (*miedo a quedarse arriba*).

En la tabla 3-2 se presentan los valores calibrados de los parámetros para cada caso

**Tabla 3-2: Parámetros modelo TSP Fernández et al (2008)
Servicios Troncales**

Parámetro	Valor	Unidad
β_0	9.32	s
β_1	2.05	s
β_2	0.88	s / pax
β_3	3.32	s
β_4	1.93	s / pax

Fuente: Fernández et al (2008)

³ El modelo presentado posee dos casos, uno para servicios troncales y otro para alimentadores. En este trabajo se implementó primero

3.4.6 Zonas Pagas

La existencia de paraderos con pago extravehicular si bien es prácticamente norma en el caso de modos ferroviarios urbanos, en superficie se considera como excepcional. En ciudades con sistemas de BRT (Bus Rapid Transit) estas estaciones son primordiales para la operación del sistema pues permite al acceso a los vehículos por todas sus puertas, maximizando la utilización de cada una y minimizando a la vez los tiempos marginales de subida y bajada.

Es por ello que se incorpora a MISTRANSIT la posibilidad de definir paraderos con zonas pagas. En la práctica, cada vez que un bus accede a un paradero de este tipo, modifica las operaciones de las puertas permitiendo tanto la subida como bajada de los pasajeros por todas ellas. Una vez que el bus termina la transferencia, las puertas vuelven a sus funciones originales para operar en los siguientes paraderos, que perfectamente pueden ser normales o nuevamente una zona paga.

3.5 Implementación de Estrategias de Asignación de Flota

En esta sección se presenta en primera instancia la modelación realizada por Tirachini (2007) para las expresiones de los costos de la operación normal del corredor, tanto para los usuarios como para el operador. La importancia de esta descripción radica en que corresponde a la base para el desarrollo de las simulaciones y el posterior análisis de beneficios de la aplicación de las estrategias, trabajo que se presenta en los capítulos sucesivos de esta memoria. Si bien Tirachini (2007) plantea dos modelos dependientes del nivel de información sobre la demanda, a continuación se muestra solamente las expresiones para el modelo desagregado pues es el que se utilizará para la simulación.

3.5.1 Formulación de Tirachini (2007)

Las variables de la modelación de costos son las siguientes:

L : Largo del corredor en el sentido i [UL]

f : Frecuencia de operación [bus/UT]

λ_k^{i+} : Tasa de llegada de pasajeros a estación k en el sentido i [pax/UT]

P_e : Valor subjetivo del tiempo de espera [\$/UT]

P_v : Valor subjetivo del tiempo de viaje [\$/UT]

R_k : Tiempo en movimiento en servicio normal entre las estaciones k y $k+1$ [UT]

b : Tiempo de subida de pasajeros [UT/pax]

x : Variable binaria que toma valor 1 si los intervalos de llegada de los buses a los paraderos es regular, y 0 si ocurren bajo un proceso Poisson.

Luego, el costo para los usuarios sin aplicar las estrategias se puede escribir de la siguiente forma:

$$CU = P_e \frac{1+x}{2} \left[\sum_{k=1}^N \frac{\lambda_k^{1+}}{f} + \sum_{k=1}^{s_0} \frac{\lambda_k^{2+}}{f} \right] + P_v \left[\sum_{k=1}^N \sum_{l=k+1}^N \left[\sum_{i=k}^{l-1} \left(R_i + b \frac{\lambda_k^{1+}}{f} \right) \right] \lambda_{kl} + \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^{k-1} \left[\sum_{i=l+1}^{l-1} \left(R_{i-1} + b \frac{\lambda_k^{2+}}{f} \right) \right] \lambda_{kl} \right] \quad (3.7)$$

El primer término corresponde al costo por tiempo de espera, mientras que el segundo al costo por tiempo de viaje. Se asume que la tasa de llegada de los pasajeros al corredor es aleatoria uniforme y los buses tienen capacidad infinita, es decir que los pasajeros pueden abordar el primer bus que arriba al paradero. Por otra parte, la expresión para el costo del operador es:

$$CO = f \left[c(k) \left(\sum_{k=1}^{N-1} \left(R_i + b \frac{\lambda_k^{1+}}{f} \right) + \sum_{k=2}^N \left(R_i + b \frac{\lambda_k^{2+}}{f} \right) \right) + 2c'(K)(L_1 + L_2) \right] \quad (3.8)$$

En donde $c(k)$ y $c'(k)$ corresponden a funciones de costo unitario por plaza ofrecida por los buses para el costo por vehículo-unidad de tiempo (expresado en [\$/veh-UT] y por vehículo-unidad de longitud (expresado en [\$/veh-UL]) . Esta formulación sigue lo propuesto por Jansson (1980) y Olfield y Bly (1988) en cuanto a una dependencia lineal con respecto a la capacidad y además se hace cargo de la existencia de dos componentes, una que depende de una base temporal (salarios) y otra de una base espacial (consumo de combustible, mantenimiento, etc.).

Luego el costo total se expresa como:

$$C = CU + CO \quad (3.9)$$

Una vez obtenidos los costos totales se puede resolver el problema de optimización requerido para cada estrategia. Los resultados de este problema corresponden a las frecuencias óptimas para cada patrón de servicios, a saber en el caso de *deadheading* se obtiene las frecuencias para el sentido de alta demanda y el sentido de baja demanda, y en bucle las frecuencias del servicio completo y del circuito corto. En general, la forma funcional resultante sigue la conocida “fórmula de la raíz cuadrada”, obtenida para un corredor aislado con demanda fija (ver Jansson (1980) entre otros).

3.5.2 Formulación para Simulación

Dada la necesidad de evaluar la aplicación de las estrategias de asignación, se ha agregado al programa el cálculo de los costos de la operación del sistema, basado en las expresiones desarrolladas por Tirachini (2007) y presentadas en 3.5.1. La principal diferencia entre ambas consiste en que la formulación a utilizar en la simulación permite obtener directamente las variables exógenas y por ende se simplifica el cálculo de los costos. El costo de los usuarios se define como:

$$C_U = P_e \sum_{p=\text{pasajeros}} TE_p + P_v \sum_{p=\text{pasajeros}} TV_p \quad (3.10)$$

TE_p : Tiempo de espera del pasajero p

TV_p : Tiempo de viaje del pasajero p

Como se puede ver de la expresión anterior, el costo del tiempo de espera se realiza sumando esta componente para cada pasajero que entra a la red en el período de simulación. Este tiempo no posee ningún supuesto detrás por lo que puede incorporar cualquier distribución de intervalos de llegada de pasajeros al paradero o tipos de llegada de buses. Esto, sumado a que los buses tienen capacidad finita permite incorporar la posibilidad de que los pasajeros no puedan abordar el primer bus, generando dos componentes para el tiempo de espera. La primera corresponde al tiempo de espera por el primer bus que arriba (Tiempo Primer Bus) y es similar al que se ha desarrollado en los trabajos analíticos y que depende entre otras cosas de la frecuencia de servicio. La segunda componente, definida como Tiempo de Espera Extra considera la demora provocada por no poder abordar el primer bus que enfrenta un pasajero. Analíticamente, este término se plantea dependiente del coeficiente de variación del intervalo de llegada de buses, como se puede ver en la ecuación 2.1.

Por otro lado, la expresión para el costo de operadores es la siguiente

$$C_o = \sum_{b=buses} \{ (c_0^{hr} + c_1^{hr} K_b) \cdot TV_b + (c_0^{km} + c_1^{km} K_b) \cdot D_b \} \quad (3.11)$$

Donde:

c_i^{km} : Parámetros de costo por distancia

c_i^{hr} : Parámetros de costo por tiempo

K_b : Capacidad del bus b

TV_b : Tiempo de viaje del bus b

D_b : Distancia recorrida por bus b

Al comparar las ecuaciones (3.8) y (3.11) se observa que esta última está basada en el cálculo de costos por cada bus que es simulado, por lo tanto es independiente (explícitamente) del valor de la(s) frecuencias(s) ofertadas. La expresión anterior además contempla valores distintos para los costos unitarios, situación deseable para la estrategia deadheading en la que el viaje fuera de servicio presenta menores costos por distancia.

4. Aplicaciones

En este capítulo se describe los escenarios definidos para la simulación de las estrategias de asignación de flota y se analiza los resultados obtenidos. Además, se presenta la red PARAMICS sobre la cual se realizarán los experimentos.

4.1 Red de microsimulación del corredor Pajaritos

La red a utilizar para evaluar la aplicación de las estrategias de asignación de flota corresponde a una representación del corredor exclusivo para buses de Avenida Pajaritos, ubicado entre las Avenidas Américo Vespucio y Alameda Bernardo O'Higgins, en la ciudad de Santiago de Chile, inaugurado en el año 2005. El proceso de codificación y calibración está descrito en Didier (2008). El corredor tiene una longitud de 4,1 Km. y está diseñado con dos pistas por sentido tanto para transporte privado como para transporte público. Consta de 11 paraderos, cuya distribución a lo largo del tramo está presentada en la figura 4-1.



Figura 4-1: Esquema Corredor Pajaritos

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 4-1: Paraderos Corredor Pajaritos
Distancias [km]

Paradero	Distancias [km]	
	Parcial	Acumulada
1 Alcalde Jorge Délano	-	0.0
2 Monte Tabor	0.30	0.3
3 Av. Las Parcelas	0.54	0.8
4 Hugo Bravo	0.28	1.1
5 Av. Teniente Cruz	0.54	1.7
6 Diagonal Los Lagos	0.39	2.1
7 Av. Las Torres	0.23	2.3
8 Curacaví	0.55	2.8
9 El Parque	0.48	3.3
10 Vista Hermosa	0.29	3.6
11 Manuel Rivas Vicuña	0.50	4.1

Fuente: Elaboración Propia

4.2 Descripción General de Escenarios de Simulación

Como se planteó anteriormente, el objetivo de este trabajo es evaluar mediante simulación la implementación de estrategias de asignación de flota en casos cuyo desarrollo analítico es complejo. Para ello se han planteado dos escenarios que analizan diferentes características tanto de oferta como de demanda del corredor. Con respecto al origen de la información utilizada para las simulaciones⁴, salvo los datos empleados en el escenario 1-A, corresponden a situaciones ajenas a la operación del corredor de Av. Pajaritos y se ocupan en esta red con fines puramente académicos. La construcción de los escenarios consiste de forma general en la comparación entre la operación normal de los servicios en el corredor versus la aplicación de alguna de las estrategias.

El valor de los parámetros de las funciones de costo a utilizar en todos los escenarios planteados se presentan en la tabla 4-2

Tabla 4-2: Parámetros de Costo

Parámetro	Valor	Unidad
P_e	2700	$\$/hr$
P_v	900	$\$/hr$
C_0^{hr}	1800	$\$/hr$
C_1^{hr}	0.5	$\$/km-plaza$
C_0^{km}	400	$\$/km$
C_1^{km}	1	$\$/km-plaza$

Fuente: Tirachini (2007)

Se debe consignar que las matrices que se presentan a continuación corresponden a un corredor de 10 paraderos, por lo tanto para su aplicación en la red de Pajaritos se definió que las paradas ubicadas en las intersecciones

⁴ Cada escenario es simulado 20 veces

de Santa Corina y Av. Las Torres representen un solo paradero, dada la cercanía entre ambos.

4.3 Escenario 1 - Deadheading

Este escenario corresponde a la evaluación de la estrategia deadheading en el corredor Pajaritos. La aplicación se extrae de Tirachini (2007) y consiste en que una parte de la flota retorna al terminal (paradero 1) sin prestar servicio en el sentido OP, que corresponde al sentido de menor carga. La demanda por transporte público está dada por la matriz OD que se muestra en la tabla 4-3 y el perfil de carga por sentido se presenta en la figura 4-2.

**Tabla 4-3: Matriz OD
Escenarios 1-A y 1-B**

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1		200	232	180	144	197	218	228	211	4425
2	67		18	14	11	15	17	17	16	337
3	19	36		107	86	117	130	135	125	2631
4	8	14	12		9	12	13	14	13	264
5	15	27	22	13		8	9	10	9	186
6	16	29	24	13	2		14	14	13	281
7	3	5	4	2	0	64		82	75	1585
8	12	22	18	10	1	4	165		38	730
9	23	42	35	20	3	2	10	189		3620
10	395	726	605	342	44	0	5	11	600	

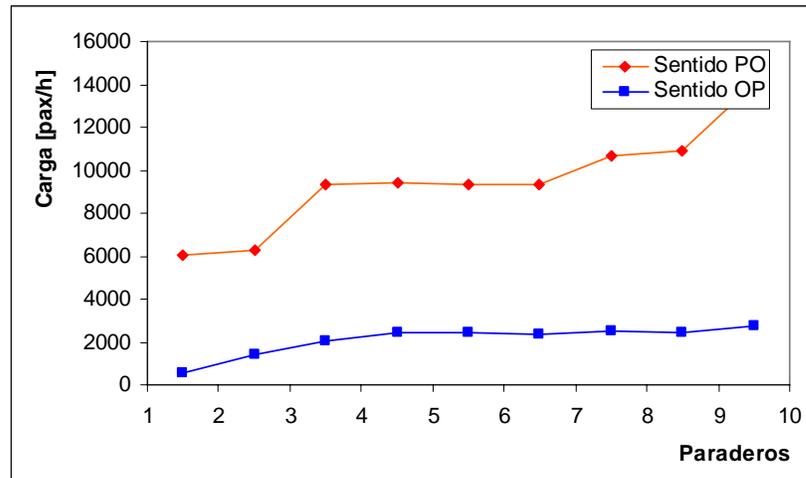


Figura 4-2: Perfil de Carga Escenario 1-A y 1-B

De la figura anterior se puede observar el desbalance existente entre la demanda de ambos sentidos, representando la carga OP aproximadamente cuatro veces la carga del sentido contrario. Intuitivamente, esta situación es propicia para la aplicación de la estrategia *deadheading*.

Se ha definido dos casos de análisis que se diferencian solamente en la etapa de cálculo de frecuencias y flotas óptimas, que se obtienen como resultado del algoritmo desarrollado en Tirachini (2007). El primero --*caso A*-- corresponde a la operación bajo el supuesto de que no existe control de intervalos de buses, es decir que estos corresponden a un proceso Poisson. El segundo --*caso B*-- supone la existencia un régimen programado de operación, por lo que de alguna forma se tiene control de intervalos.

Cabe destacar que este último punto no fue aplicado en este trabajo pues resulta complejo manejar en la simulación la regularidad de intervalos, en especial para magnitudes pequeñas como las que se observan de la operación del corredor bajo el escenario planteado. No obstante lo anterior, la suposición de intervalos regulares resulta útil desde el punto de vista práctico puesto que entrega niveles de frecuencia para el servicio *deadheading* que se equiparan con los obtenidos con el servicio normal, haciendo más patente la diferencia en las frecuencias ofertadas entre el sentido más cargado y el menos cargado (100 % vs. 14 % del caso A).

Las frecuencias y tamaños de flota requeridos para la operación se presentan en las tablas 4-6 y 4-7 para ambos casos analizados. Estos valores fueron corregidos para representar de mejor manera las condiciones simuladas en cuanto al tiempo de viaje entre estaciones.

Tabla 4-4: Frecuencias y Flotas Escenario 1-A

Operación	Flota	Frecuencias [veh / hr]	Tamaño Flota [veh]
NORMAL	-	200	238
ESTRATEGIA	normal	178	212
	<i>deadheading</i>	26	29
	total⁵	204	241

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 4-5: Frecuencias y Flotas Escenario 1-B

Operación	Flota	Frecuencias	Tamaño Flota
NORMAL	-	180	228
ESTRATEGIA	normal	100	120
	<i>deadheading</i>	100	120
	total	200	240

Fuente: Elaboración Propia

5.3.1 Caso A : Deadheading con Flota Variable

La tabla 4-6 presenta un resumen de los costos obtenidos en las simulaciones del escenario de aplicación de la estrategia *deadheading* en el corredor de Av. Pajaritos, de acuerdo a las condiciones expuestas en 4.3.1.

Tabla 4-6: Costos Escenario 1-A

	COSTOS [\$/hr]			TOTAL
	Tiempo Espera	Tiempo Viaje	Operadores	
normal	5694776	2391804	876267	8962847
estrategia	6039925	2448889	718012	9206826
BENEFICIO	-6.1%	-2.4%	18.1%	-2.7%

Fuente: Elaboración Propia

⁵ En términos de frecuencia se refiere a la máxima que se puede encontrar en los tramos con mayor oferta del corredor, es decir donde la estrategia correspondiente es aplicada

De esta tabla se puede observar que globalmente solo existen beneficios para los operadores, dados principalmente por la reducción en el tiempo de ciclo de la flota que realiza *deadheading*. Esto ocurre aun cuando la flota total aumentó de 238 a 241 buses pues a su vez la flota con servicio normal disminuyó en 22 vehículos (~ 10 %). Así, el costo horario de operación disminuyó en un 5.5 % y el costo total de operadores en 2.6 %.

En cuanto a los usuarios, los resultados no reportan beneficios para ninguno de los ítems analizados, ya sea tiempo de espera total y el tiempo de viaje. En el primer caso, la aplicación de la estrategia hace aumentar un 50 % los tiempos de espera en promedio en el sentido menos cargado, tendencia razonable dada la menor oferta de frecuencias en dirección oriente-poniente. En el sentido contrario, si bien la oferta de servicios es mayor (+ 2%), la espera aumenta en un 1 % lo que se puede explicar en parte pues el aumento de frecuencias trajo consigo un aumento en los niveles de congestión en paraderos, por lo que las frecuencias efectivas disminuyeron.

En el detalle de las componentes del tiempo de espera, se observa que la razón por la cual se generaron desbeneficios proviene del hecho que los pasajeros esperan más por el primer bus que llega, con respecto a la situación normal. Globalmente esto se reproduce en un aumento de 4% en este ítem, y si el análisis se realiza por sentidos, la dirección OP es en la cual evidentemente se presentan mayores perjuicios, llegando a ser aproximadamente 30% más de tiempo de espera del primer bus con respecto a la situación normal (figura 4-3). En sentido contrario se observa aumento de aproximadamente 1.7% por este mismo concepto.

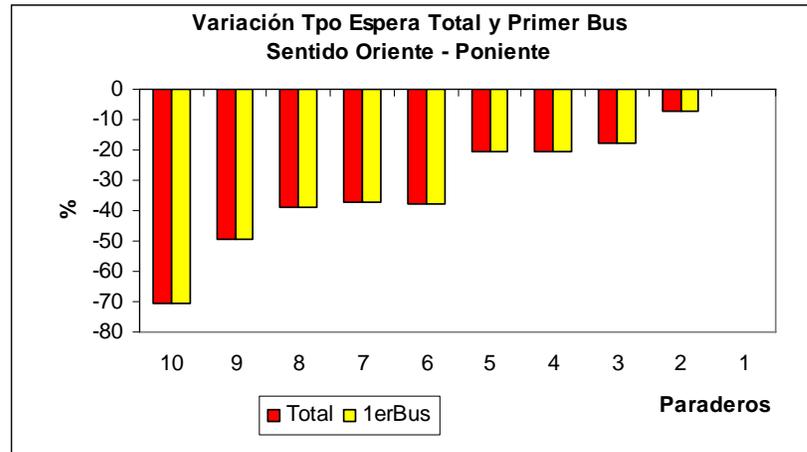


Figura 4-3: Beneficios por efecto de tiempos de espera Sentido Oriente – Poniente Escenario 1-A

La otra componente del tiempo de espera, el tiempo extra, genera desutilidad en el sentido PO de aproximadamente 4 %, lo que quiere decir que a la vez que el tiempo de pasada de los buses aumenta, el tiempo promedio que pasa entre ese instante y subida a un vehículo también. Analizando por paraderos, y de acuerdo con la figura 4-4 se puede ver que los mayores problemas existen en el paradero 3, que tiene que ver con su nivel alto de demanda de ingreso al sistema. Ahora bien, el paradero 1 es el que presenta la mayor tasa de ingreso al corredor pero como los buses a esa altura están vacíos no existe tiempo extra, lo que si ocurre en el paradero 3.

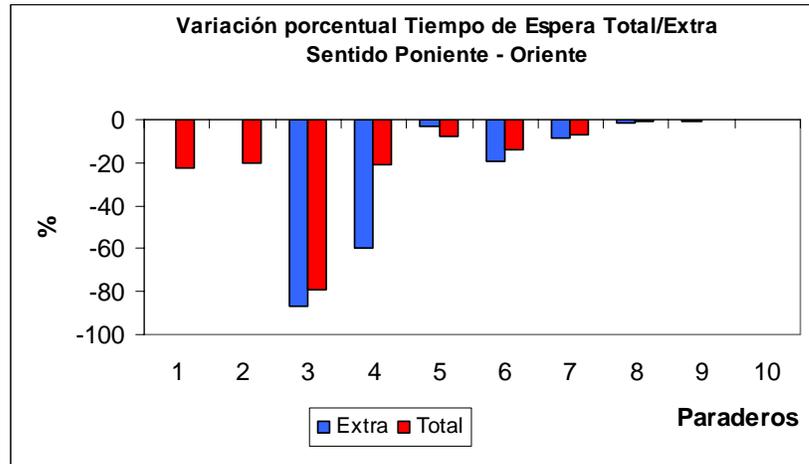
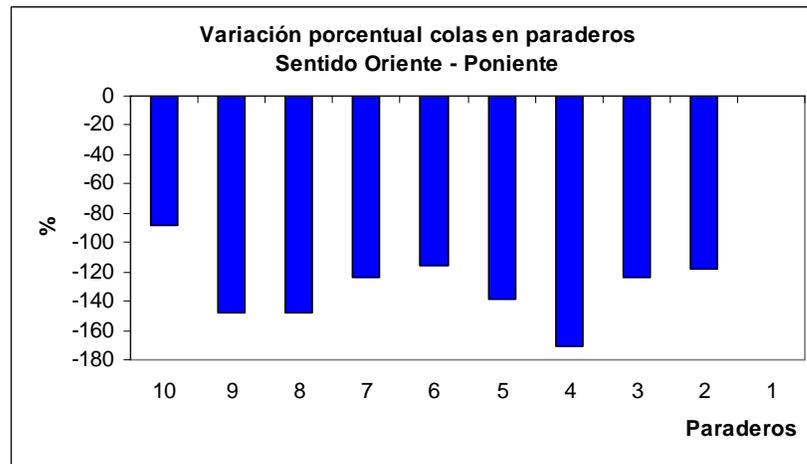


Figura 4-4: Beneficios por efecto de tiempos de espera Sentido Poniente – Oriente Escenario 1-A

En el sentido OP la situación se mantiene constante pues ni antes ni después de la estrategia se reportan tiempos de espera extra.

Con respecto a las longitudes de cola en paraderos, los resultados obtenidos presentan la misma tendencia que la encontrada en el análisis de tiempos de viaje. En el sentido OP la aglomeración de pasajeros se en promedio se duplicó a lo largo del corredor por concepto de la reducción de frecuencia, situación que se puede ver a partir de la figura 4-5.



**Figura 4-5: Beneficios por reducción de pasajeros en espera
Sentido Oriente – Poniente
Escenario 1-A**

El sentido contrario, presenta en promedio desbeneficios menores al 1 %, y en detalle (ver figura 4-6) se puede comprobar que desde los paraderos 4 en adelante si existió reducción en la cantidad de pasajeros esperando por un bus, a pesar de enfrentar tiempos levemente mayores. La mejora se contrasta con la situación observada en los paraderos 2 y 3, en especial en este último, en donde se aprecia que los usuarios esperan más para poder abordar un bus y además la aglomeración presente es mayor. A la luz de estos resultados, se puede afirmar que la aplicación de *deadheading* para esta situación resulta ineficiente en términos de mejoras en los indicadores de calidad de servicio.

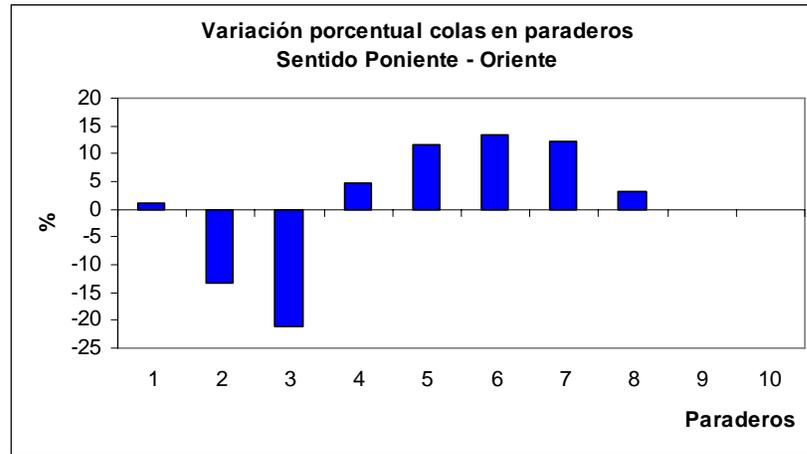


Figura 4-6: Beneficios por reducción de pasajeros en espera Sentido Poniente - Oriente Escenario 1-A

5.1.2 Caso B

La tabla 5-1 presenta un resumen de los costos obtenidos en las simulaciones del escenario de aplicación de la estrategia *deadheading* en el corredor de Av. Pajaritos, de acuerdo a las condiciones expuestas en 4.3.2.

Tabla 4-7: Costos Escenario 1-B

	COSTOS [\$/hr]			TOTAL
	Tiempo Espera	Tiempo Viaje	Operadores	
normal	7507579	2167588	770015	10445182
estrategia	5703966	2358259	798328	8860553
BENEFICIO	24.0%	-8.8%	-3.7%	-2.7%

Fuente: Elaboración Propia

A diferencia del caso A, el balance se invierte pues los operadores enfrentan pérdidas operacionales de aproximadamente 4%, que provienen fundamentalmente de la componente temporal de los costos, es decir los buses están más tiempo circulando.

Razonablemente, y al igual que el caso anterior, la figura 5-5 muestra que en todos los paraderos del sentido OP el tiempo de espera aumentó por concepto

de reducción de frecuencia. El promedio del sentido es de un 40 % y solo considera la espera del primer bus pues no existe tiempo extra tanto en la operación normal como en la operación con estrategia

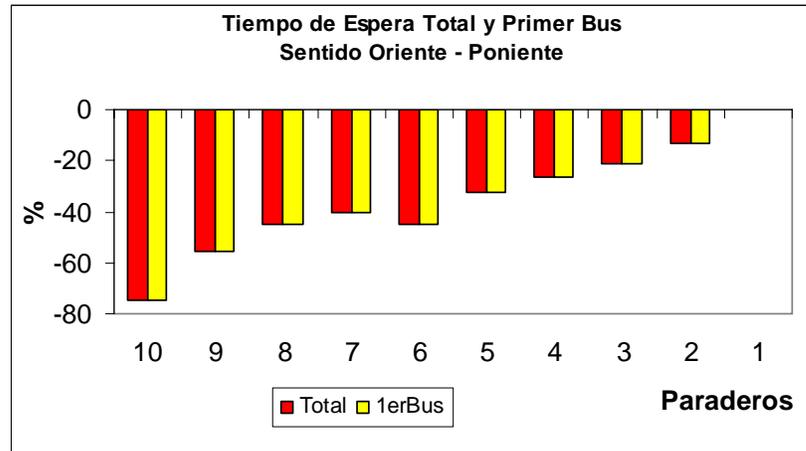


Figura 4-7: Beneficios por efecto de tiempos de espera Sentido Oriente – Poniente Escenario 1-B

En el sentido PO, en cambio, la estrategia resulta beneficiosa en cuanto a que el tiempo de espera se reduce en sus dos componentes. El tiempo de espera por el primer bus mejora en 14 % y el tiempo extra se ve reducido en 60 %, siendo la mayor causa de la baja en los tiempos totales, tal como se puede ver en la figura 5-6

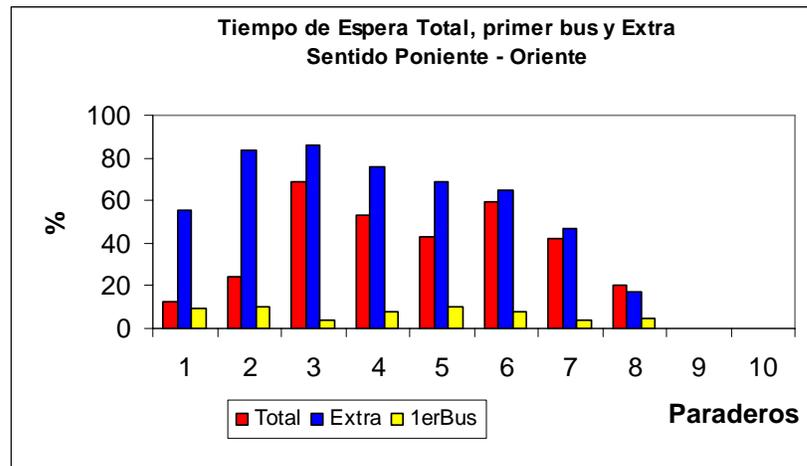


Figura 4-8: Beneficios por efecto de tiempos de espera Sentido Poniente - Oriente Escenario 1-B

4.4 Escenario 2 - Bucle en extremo del corredor

Este escenario corresponde a la evaluación de la estrategia bucle, con carga concentrada en un extremo del corredor. El análisis se basa en un ejemplo de Delle Site y Filippi (1998) para un corredor ficticio pero que según los autores representa las condiciones de operación en la ciudad de Roma para la punta mañana. Se plantea simular tres casos diferentes: el primero es el ejemplo original de los autores italianos, el segundo es una amplificación de los viajes al interior de la zona en que es aplicado el bucle y el tercero es la operación del caso anterior con flota fija.

4.4.1 Caso A: Demanda Base

4.4.1.1 Datos

La demanda por transporte público para este caso está dada por la matriz OD que se muestra en la tabla 4-8.

Tabla 4-8: Matriz OD Escenario 2-A

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1		29	14	64	4	3	3	1	1	25
2	14		15	70	4	4	3	1	1	27
3	5	5		49	3	3	2	1	0	19
4	8	7	4		18	15	12	4	3	111
5	74	63	35	0		5	4	1	1	37
6	4	4	2	0	0		5	2	1	50
7	1	1	0	0	0	3		20	16	636
8	8	6	3	0	0	26	5		7	262
9	16	14	7	0	0	58	11	0		77
10	13	11	6	0	0	47	9	0	10	

Fuente: Delle Site y Filippi (1998)

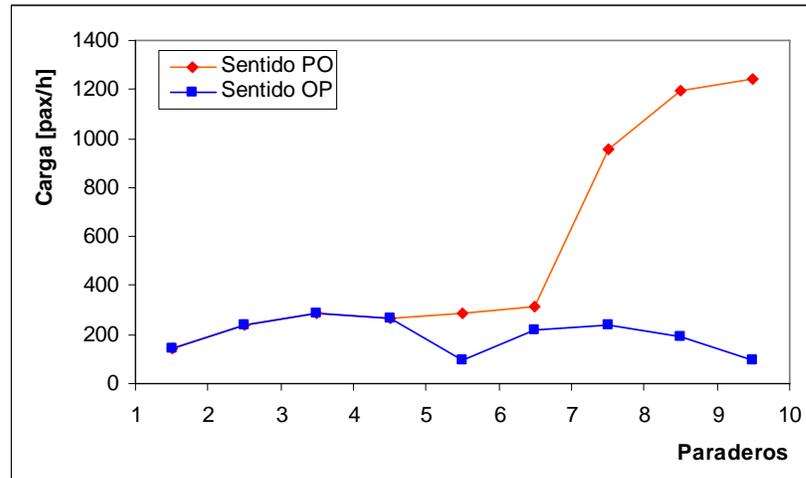


Figura 4-9: Perfil de Carga Escenario 2-A

Fuente: Delle Site y Filippi (1998)

Como se puede apreciar del perfil de carga mostrado en la figura 4-3, en el sentido poniente entre los paraderos 7 y 10 del corredor existe un peak de demanda, para el cual se genera un servicio corto entre las estaciones mencionadas.

Por otra parte, el tamaño de flota y la frecuencia ofertada en el servicio se presenta en la tabla 4-9. Al igual que el escenario 1, estas fueron obtenidas del algoritmo desarrollado en Tirachini (2007) para el cálculo de las frecuencias óptimas con tamaño de flota variable.

**Tabla 4-9: Frecuencias y Flotas
Escenario 2-A**

Operación	Flota	Frecuencias [veh / hr]	Tamaño Flota [veh]
NORMAL	-	32	27
ESTRATEGIA	normal	22	20
	bucle	26	7
	total	48	27

Fuente: Elaboración Propia

4.4.1.2 Datos

La tabla 4-11 presenta un resumen de los costos obtenidos en las simulaciones de este escenario.

Tabla 4-11: Costos Escenario E2 [\$ / hr]

	COSTO			TOTAL
	T Espera	T Viaje	Operadores	
normal	324235	131758	127742	583734
estrategia	281569	12654	132854	565510
BENEFICIO	4.4%	6.9%	-4.0%	3.1%

Los resultados muestran que la estrategia resulta beneficiosa para los usuarios, en cuanto mejoran los promedios de tiempo de espera y tiempo de viaje. No es el caso de los operadores, pues la componente horaria de los costos aumentó tras la aplicación del bucle en aproximadamente 5 %.

El análisis por sentido indica para los viajes Oriente-Poniente que la comparación pre y post estrategia es negativa para esta última, al aumentar los tiempos de espera en todos los paraderos (figura 5-7). Dado que no hay esperas extras, el efecto se produce solamente por reducción de frecuencias efectivas, lo que resulta contra intuitivo pues en el tramo 5-8 la estrategia hace aumentar en 33 % la frecuencia ofertada.

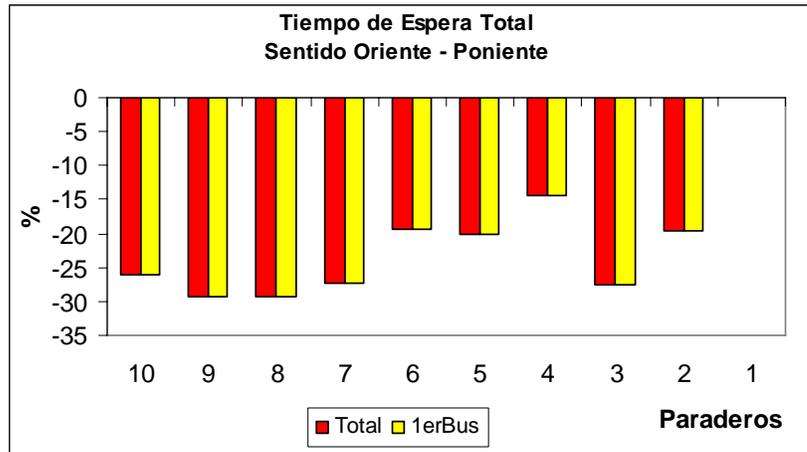


Figura 4-10: Beneficios por efecto de tiempos de espera Sentido Poniente - Oriente Escenario 2-A

Para el sentido Poniente – Oriente, los resultados reflejan la tendencia esperada a priori, de tener desbeneficios en los tiempos de espera en los paraderos fuera del bucle, y beneficios en las estaciones que enfrentan aumento de frecuencia. En la figura 4-11 se puede apreciar además que la estrategia permite eliminar la espera extra de los pasajeros en los paraderos 7 y 8 (beneficios de 100 %), y además que el paradero más perjudicado es el 6, el cual es justamente el último del tramo en que no es aplicada la estrategia. Al poseer esta condición, los pasajeros en conjunto de observar buses más llenos que en los paraderos antecesores, enfrentan un intervalo mayor entre vehículos, haciendo que su posición al límite del *peak* de demanda les haga el doble de tiempo por abordar un vehículo, en comparación con la operación sin estrategia.

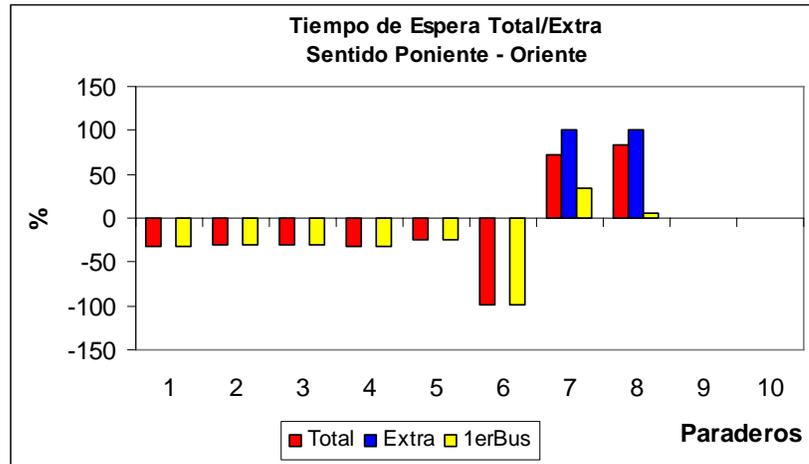


Figura 4-11: Beneficios por efecto de tiempos de espera Sentido Poniente - Oriente Escenario 2-A

4.4.2 Caso B: Demanda Amplificada

4.4.2.1 Datos

Este caso corresponde a la amplificación de la demanda al interior de la zona en donde es aplicada la estrategia. En el sentido Oriente-Poniente se ha aumentado en 10 veces la cantidad de viajes en el tramo comprendido entre las paradas 10 y 7, lo que se ve reflejado en el perfil de carga mostrado en la figura 4-4. La matriz de viajes correspondiente se muestra en la tabla 4-10.

Tabla 4-12: Matriz OD Escenario 2-B

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1		29	14	64	4	3	3	1	1	25
2	14		15	70	4	4	3	1	1	27
3	5	5		49	3	3	2	1	0	19
4	8	7	4		18	15	12	4	3	111
5	74	63	35	0		5	4	1	1	37
6	4	4	2	0	0		5	2	1	50
7	1	1	0	0	0	3		20	16	636
8	8	6	3	0	0	26	100		7	262
9	16	14	7	0	0	58	220	110		77
10	13	11	6	0	0	47	120	125	450	

Fuente: Delle Site y Filippi (1998)

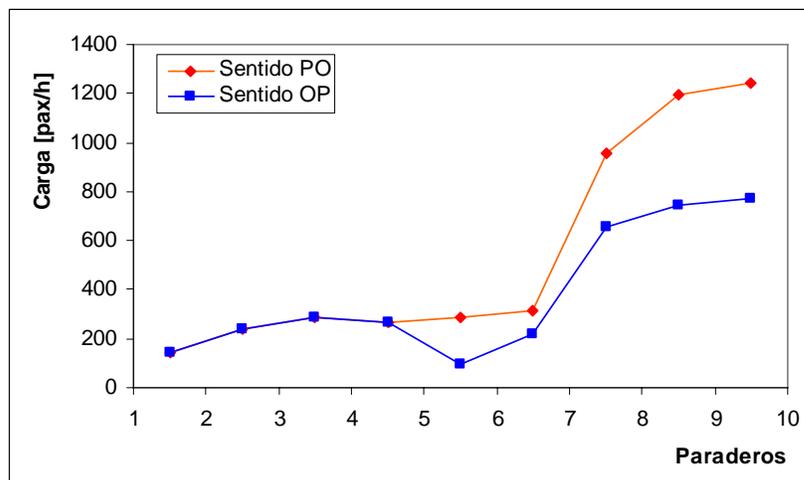


Figura 4-12: Perfil de Carga Escenario 2-B

Fuente: Elaboración Propia

La flota a utilizar en este caso, en conjunto con la frecuencia ofertada para cada servicio se presenta en la tabla 4-13 y fue obtenida de la misma forma que para el caso anterior.

**Tabla 4-13: Frecuencias y Flotas
Escenario E2-B**

Operación	Flota	Frecuencias [veh]	Tamaño Flota [veh / hr]
NORMAL	-	40	48
ESTRATEGIA	normal	24	28
	bucle	52	18
	total	76	46

Fuente: Elaboración Propia

4.4.2.1 Resultados

La tabla 4-14 presenta un resumen de los costos obtenidos en las simulaciones de este escenario.

Tabla 4-14: Costos Escenario E2-B

	COSTO [\$/hr]			TOTAL
	T Espera	T Viaje	Operadores	
normal	294658	144115	161155	599928
estrategia	195929	106826	172726	475481
BENEFICIO	33.5%	25.9%	-7.2%	20.7%

Nuevamente los indicadores generales de costos muestran que la aplicación de la estrategia resulta beneficiosa para los usuarios, aunque en este caso y dado el aumento en la demanda al interior del bucle, las mejoras en frecuencia si bien en proporción no fueron distintas con respecto al caso anterior, resultaron cualitativamente más determinantes, llegando a ser mayores que los beneficios por tiempo de viaje.

Desde el punto de vista de los paraderos para el sentido Oriente-Poniente, la figura 4-13 muestra que existen dos tramos distintos que son determinados por la longitud del bucle. Desde el paradero 10 al 8 existen beneficios pues corresponden a los paraderos que ven aumentada la frecuencia del servicio. Desde el paradero 6 en adelante es razonable que los resultados muestren empeoramiento en este ítem por el aumento de los intervalos.

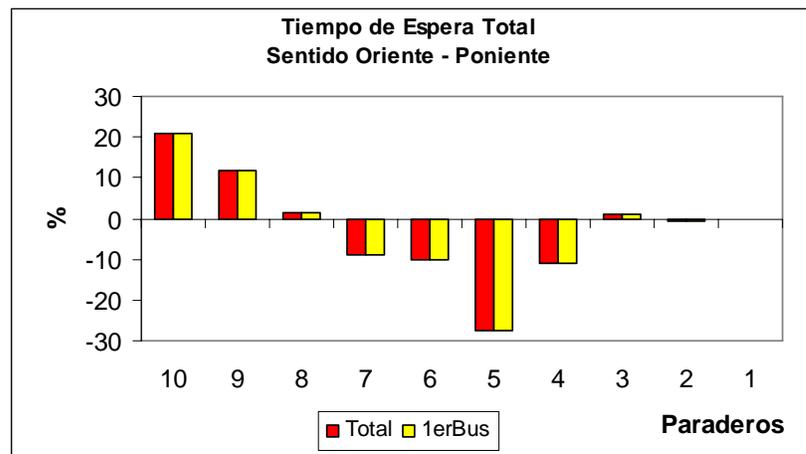


Figura 4-13: Beneficios por efecto de tiempos de espera Sentido Oriente - Poniente Escenario 2-B

El caso del paradero 7 es particular⁶ pues si bien forma parte del bucle, en el sentido OP es la detención final del servicio, es decir que la operación de este no influye en los tiempos de espera de los pasajeros que arriban a la estación pues ellos sólo ven la frecuencia del servicio que atraviesa el corredor completo.

El sentido Poniente - Oriente presenta un corte similar con respecto a las dos zonas del corredor y a los resultados esperados, pero con la diferencia que además de reducirse el tiempo de espera del primer bus, el tiempo extra fue eliminado completamente de corredor (ver figura 4-14). De esta forma todos los pasajeros se suben al primer bus, situación no usual en los paraderos al interior del bucle en el caso de la operación sin estrategia.

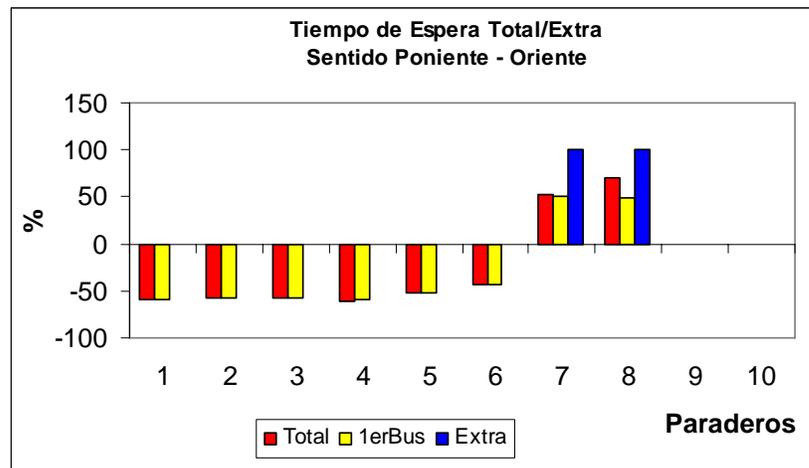


Figura 4-14: Beneficios por efecto de tiempos de espera Sentido Poniente - Oriente Escenario 2-B

⁶ Particular para efectos de la comparación de resultados, pues es natural tener este tipo de comportamiento cuando se aplica bucles.

5. Conclusiones y Comentarios

Las estrategias de asignación de flota pretenden ajustar la oferta de servicios al patrón de demanda existente mediante diferenciación de frecuencias y eventualmente flota con vehículos de distintos tamaños. En este trabajo se ha buscado desarrollar las herramientas necesarias para la microsimulación de tales políticas de gestión, en el caso de un corredor de transporte público de superficie y además la evaluación de factores difíciles de medir a través de una modelación puramente analítica. Para ello se utilizó el módulo MISTRANSIT, basado en el simulador PARAMICS y que fue desarrollado por Burgos (2006), incluyendo funcionalidades que permiten el manejo adecuado de vehículos como parte de una flota y que no estaban contempladas originalmente, como por ejemplo la diferenciación entre un servicio de bus y un vehículo físico. Otras mejoras al programa provienen de agregar el cálculo de costos operacionales y de usuarios, la posibilidad de definir paraderos con pago extravehicular e incorporar múltiples formas de modelar los tiempos de llegada de pasajeros a paraderos por mencionar algunas.

En los experimentos se ha comprobado que el supuesto de que los pasajeros abordan el primer bus que arriba al paradero no es aplicable en todos los casos debido a que los buses pueden viajar a capacidad; cuando no lo es, el tiempo remanente hasta que la persona se sube efectivamente a un vehículo se convierte en la componente principal del tiempo de espera, superando con creces al tiempo por el primer bus. Un ejemplo de ello es la Figura 4-8, de donde se puede apreciar que el aumento en frecuencia para el sentido oriente poniente significó reducciones en promedio de 40% en el tiempo de espera extra para cada paradero. Con ello, el costo por tiempo de espera en todo el corredor se redujo en 24%.

Dado que esta situación es una buena medida del nivel de hacinamiento presente en el sistema, resultaría interesante considerar dentro de un desarrollo posterior la valoración diferenciada entre las dos situaciones de espera, teniendo un valor del tiempo desde que se entra al sistema y hasta que llega el primer bus, y otro valor si es que no puede abordarlo.

Con respecto a la implementación de los experimentos, se debe destacar que fue necesario resolver e implementar situaciones que no son contemplados en los desarrollos analíticos y que resultan vitales a la hora de simular las estrategias. En el caso del escenario con estrategia *deadheading* por ejemplo, la operación en el sentido más cargado tiene intervalos de 17 segundos, lo que lleva inevitablemente a observar congestión en paraderos y por ende puede crear distorsión a los resultados. Esto ocurre pues los movimientos de adelantamiento a pesar de tener un mejor tratamiento en este trabajo, no ha sido posible manejarlos completamente, especialmente en el caso de ocupación efectiva de los sitios de parada.

También se tuvo que discernir acerca de la distribución de la flota en cada una de las cabeceras de inicio de servicio, la cual fue dividida en partes iguales por simplicidad. Un análisis más acabado entregaría la distribución óptima de los vehículos para reforzar las cabeceras con mayores requerimientos de flota, que depende tanto de la frecuencia de salida desde el cabezal como del tiempo de viaje de los buses a lo largo del sentido contrario.

Con respecto a los resultados de los escenarios, el análisis propuesto define dos campos de evaluación de las estrategias; uno global que tiene que ver con la comparación de costos totales y otro específico con en contraste de tiempos de espera y colas en paraderos. Se ha comprobado que concentrarse sólo en el primer nivel lleva consigo un sesgo importante pues esconde las tendencias observadas en beneficios y/o desbeneficios locales que indican de mejor

manera donde y como se las ventajas de la aplicación de la estrategia afectan los niveles de servicio del sistema.

Como desarrollo posterior se plantea simular la estrategia combinada bucle-*deadheading* llamada “integrada” en Tirachini (2007), la cual se hace cargo de perfiles de demanda concentrados en algún tramo del corredor pero no necesariamente coincidentes en los paraderos de inicio / término de los tramos peak de pasajeros. Además, resultaría interesante incorporar la posibilidad de que los buses al enfrentar un paradero con todos sus sitios ocupados y no hayan pasajeros cuyo destino sea tal, pueda no servir esa estación. Esta medida es conocida como *Station Skipping* y la dificultad de implementación se encuentra en las limitantes impuestas por PARAMICS para la operación de vehículos de transporte público.

Finalmente, se puede afirmar que el uso de herramientas de simulación a diferencia de la modelación analítica permite determinar de manera más precisa los valores de las variables resultantes de la operación de un corredor de transporte público, como lo son por ejemplo tiempos de espera de los pasajeros en paraderos, tiempos de ciclo, demoras y detenciones de los buses. Esto implica agregar a la evaluación de implementación de estrategias de asignación de flota un nuevo nivel de análisis ya a nivel de paraderos o incluso de pasajeros individuales, el cual es capaz de detectar mejoras o empeoramientos locales por ejemplo a nivel de tramos del corredor. Otra implicancia es que es posible definir un proceso iterativo en el cual los modelos analíticos se retroalimentan con valores actualizados resultantes de la simulación con frecuencias y tamaños de flota óptimos. El desarrollo de este proceso dentro de una herramienta de análisis de corredores de transporte público se convierte en un potencial trabajo futuro.

6. Bibliografía y Referencias

Bowman LA y Turnquist MA (1980). Service frequency, schedule reliability and passenger wait times at transit stops. *Transportation Research* 15A(6), 465-471.

Burgos V (2006). Nuevo enfoque para modelar la operación del transporte público en microsimuladores de tráfico. Tesis de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, mención Transporte. Universidad de Chile.

Ceder A y Stern HI (1981). Deficit function bus scheduling with deadheading trip insertions for fleet size reduction. *Transportation Science* 15(4), 338-362.

Chu L, Liu HX y Recker W (2003). Development of the capability-enhanced PARAMICS simulation environment. *Proceedings of the 82th Transportation Research Board Annual Meeting, Washington D.C.*

Cortés CE, Burgos V y Fernández R (2006). Modelling passengers, buses and stops in traffic microsimulators: MISTRANSIT approach. *Proceedings of the 86th Transportation Research Board Annual Meeting, Washington D.C.*

Cortés CE y Tirachini A (2007). Disaggregated modelling of pre-planned short-turning strategies in transit corridors. *Proceedings of the 86th Transportation Research Board Annual Meeting, Washington D.C.*

Cowan, JR (1975). Useful headway models. *Transportation Research* 9(6) 371-375.

Danas A (1980). Arrival of passengers and buses at two London bus-stops. *Traffic Engineering and Control* 21(10), 472-475.

Delle Site P y Filippi F (1998). Service optimization for bus corridors with short-turn strategies and variable vehicle size. *Transportation Research* 32A(1) 19-38.

Didier A (2008). Calibración y simulación de un corredor de transporte público en microsimulador de tráfico PARAMICS. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil de Industrias, con Diploma en Ingeniería de Transporte. Pontificia Universidad Católica de Chile.

United States Department of Transportation (2006). Integrated corridor management phase 1 task 5.5. Documento de trabajo

Fernández R, Cortés CE y Burgos V (2007). Microscopic simulation of transit operations. The MISTRANSIT application programming interface. Enviado a ASCE Journal of Transportation Engineering.

Fernández R, del Campo MA y Sweet C (2008). Recolección de datos y calibración de modelos de tiempo de servicio de pasajeros en buses y metro de Santiago. Actas del XV Congreso Panamericano de Ingeniería de Transporte y Tránsito, Cartagena de Indias.

Furth PG (1985). Alternating deadheading in bus route operations. Transportation Science 19(1),13-28.

Janson JO (1980). A simple bus line model for optimization of service frequency and bus size. Journal of Transport Economics 14, 53-80.

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

Luethi M, Weidmann U y Nash A (2006). Passenger arrival rates at public transport stations. Institute for Transport Planning and System ETH Zurich. Documento de trabajo

Oldfield RH y Bly PH (1988). An analytic investigation of optimal bus size. Transportation Research 22B, 319-337.

Seddon PA y Day MP (1974). Bus passenger waiting times in Greater Manchester. Traffic Engineering and Control 15(9), 442-445.

Tirachini A (2007). Estrategias de asignación de flota en un corredor de transporte público. Tesis de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, mención Transporte. Universidad de Chile.