



**UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**

**DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE CONTROL DINÁMICAS PARA TRANSPORTE  
PÚBLICO BASADO EN ESQUEMAS DE PLANIFICACIÓN DE FLOTA**

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA  
INGENIERÍA, MENCIÓN TRANSPORTE**

**ALEJANDRA DEL CARMEN PILLAJO DE LA CRUZ**

**PROFESORES GUÍA:  
CRISTIÁN EDUARDO CORTÉS CARRILLO  
DORIS ANDREA SÁEZ HUEICHAPAN**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
MARCELA MUNIZAGA MUÑOZ  
GONZALO ACUÑA LEIVA**

**SANTIAGO DE CHILE  
DICIEMBRE 2010**

RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR AL GRADO  
DE MAGISTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA,  
MENCION TRANSPORTE

POR: ALEJANDRA PILLAJO DE LA CRUZ

FECHA: 20/01/2011

PROF. GUIA: SR. CRISTIÁN CORTÉS C.

PROF. GUIA: SRA. DORIS SÁEZ H.

## **DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE CONTROL DINÁMICAS PARA TRANSPORTE PÚBLICO BASADO EN ESQUEMAS DE PLANIFICACIÓN DE FLOTA**

La operación del sistema de transporte público se ve afectada por variaciones inesperadas en las condiciones de operación que ocurren a lo largo del día, invalidando en muchos casos los itinerarios preestablecidos por los operadores. Si los operadores no toman medidas en tiempo real, el resultado podría ser un pobre desempeño del servicio ofrecido. Para de alguna forma remediar estas irregularidades, los operadores usan una variedad de estrategias de control en tiempo real que intentan mejorar el desempeño del sistema. Dos grupos de estrategias son de interés, las de control en tiempo real y las basadas en esquemas de planificación de flota. Las estrategias de control en tiempo real, retención de vehículos y salto de estación, se cuentan entre las más directas de implementar. Entre las estrategias basadas en esquemas de planificación de flota se escogen la de inyección de vehículos y *bucles*. La primera incorpora vehículos al sistema para mejorar su operación mientras que la segunda opera exclusivamente en ciclos cortos al interior de un corredor completo.

Las estrategias de inyección y *bucles* que antes eran diseñadas como herramientas de planificación de flota ahora son adaptadas en su versión en tiempo real dentro de un esquema de control predictivo. Para ello, se desarrollan modelos analíticos de control predictivo híbrido tomando en cuenta una combinación de las estrategias **retención, salto de estación e inyección de buses en ciclo corto**. El problema formulado con una función objetivo dinámica *ad-hoc* es resuelto mediante enumeración explícita.

El diseño de la estrategia de control es programado en una herramienta de aplicación del microsimulador PARAMICS (PARAllel MICROscopic Simulation) y validado mediante experimentos de simulación. Cada experimento considera la operación del sistema bajo un tipo de controlador en tiempo real y la demanda de usuarios en paradero. Se escoge un controlador experto simple para compararlo con el controlador predictivo híbrido propuesto.

Los resultados demuestran que el controlador predictivo híbrido logra mayor ahorro en tiempo de espera para los usuarios también un menor costo para los operadores en comparación con el controlador experto simple.

## **AGRADECIMIENTOS**

Esta meta no hubiera sido posible sin la ayuda de personas extraordinarias y circunstancias especiales que se dieron en esta etapa de mi vida en Chile.

En primer lugar quiero agradecer profundamente a DIOS y a mi familia por su apoyo incondicional y ejemplo de fortaleza y de superación.

A mis AMIGOS a quienes considero parte importante de mi vida y de quienes aprendí lecciones de vida invaluable. Entre ellos quiero hacer un reconocimiento especial a los más cercanos.

Alfredo Núñez, Pablo Medina, Felipe Aguila, Diego Proaño y Ricardo Valencia a quienes admiro y aprecio mucho. Gracias por estar presente en momentos inolvidables de mi vida y de quienes recibí mucho apoyo y cariño.

Alejandra Valencia, Diana Jiménez, Gaby Maldonado y Vanesa Burgos con quienes pasé una época “jugosa” en el quinto piso de transporte.

A Juan Enrique Cannobio, Víctor Ramírez y mis compañeros de ICR Consultores: Carlos Avendaño, Carlos Salgado, Carlos Bravo, Gustavo Otárola y Alvaro Sepúlveda que me apoyaron en la etapa final de la tesis.

A mis profesores guía, Cristián Cortés y Doris Sáez que junto con los miembros de la comisión del programa de Magíster de Transporte colaboraron de una forma decisiva en el inicio y culminación de esta meta.

A los profesores integrantes de la comisión examinadora, Marcela Munizaga y Gonzalo Acuña por su participación en esta tesis.

Finalmente al proyecto ACT-32, “Control inteligente en tiempo real para sistemas de tránsito integrados” que financió parcialmente el desarrollo de esta investigación.

**Alejandra Pillajo de la Cruz**

## INDICE

1	INTRODUCCIÓN .....	1
1.1	Motivación.....	1
1.2	Objetivo general .....	2
1.3	Objetivos específicos.....	2
1.4	Contenido .....	2
2	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....	4
2.1	Estrategias de control de transporte.....	4
2.1.1	Estrategia de retención .....	5
2.1.2	Estrategia de salto de estación.....	8
2.1.3	Estrategia de inyección de buses y estrategia <i>bucles</i> .....	9
2.1.4	Estrategias de control combinadas .....	13
2.2	Microsimuladores de tráfico.....	15
2.2.1	Microsimulador PARAMICS.....	16
2.2.2	Herramienta de modelación MISTRANSIT.....	18
3	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	20
3.1	Descripción del sistema de transporte público .....	21
3.2	Operación del sistema.....	23
4	CONTROL EXPERTO SIMPLE.....	28
4.1	Estrategia de retención y salto de estación .....	28
4.2	Estrategia de inyección de buses en ciclo corto .....	31
4.2.1	Frecuencia de diseño .....	33
4.2.2	Tiempo de inyección .....	34
4.3	Control experto con estrategias de retención, salto e inyección de buses .....	35
4.4	Discusión .....	35
5	DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE CONTROL PREDICTIVO HÍBRIDO CON INYECCIÓN DE BUSES .....	37
5.1	Estrategia de inyección de buses en ciclo corto .....	37
5.1.1	Detección de un aumento inesperado en la demanda.....	37
5.1.2	Partición de la demanda.....	40

5.1.3	Diseño de la estrategia de inyección de buses.....	41
5.2	Control predictivo híbrido con estrategia integrada .....	44
5.2.1	Modelo en variables de estado.....	45
5.2.2	Acciones de control .....	52
5.2.3	Función objetivo .....	54
5.2.4	Restricciones.....	56
6	VALIDACIÓN DEL DISEÑO MEDIANTE SIMULACIÓN .....	58
6.1	Modelación de la red en PARAMICS .....	58
6.2	Diseño del controlador experto simple.....	62
6.2.1	Estrategia de retención y salto de estación .....	63
6.2.2	Estrategia de inyección de buses en ciclo corto .....	67
6.2.3	Estrategia integrada .....	70
6.3	Diseño con control predictivo híbrido .....	72
6.3.1	Estrategia de retención y salto de estación .....	72
6.3.2	Estrategia de inyección de buses en ciclo corto .....	72
6.3.3	Estrategia integrada .....	73
7	EXPERIMENTOS Y RESULTADOS .....	78
7.1	Red de modelación en PARAMICS .....	78
7.2	Escenarios de simulación.....	80
7.2.1	Demanda de usuarios en el sistema de transporte público .....	81
7.2.2	Programación de flota.....	84
7.2.3	Características de la simulación .....	86
7.3	Calibración de ponderadores de la función objetivo .....	86
7.4	Parámetros de costos .....	87
7.5	Reporte de resultados.....	89
7.5.1	Tablas de resultados con demanda base .....	90
7.5.2	Tablas de resultados con demanda incrementada.....	93
7.6	Análisis de resultados .....	98
8	CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO .....	100
9	REFERENCIAS.....	103

# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 Motivación

La operación de los sistemas de transporte público de superficie se ven afectados por variaciones inesperadas que ocurren a lo largo del día y en determinados sectores, invalidando de alguna manera los itinerarios preestablecidos. En efecto, si los operadores no toman medidas en tiempo real cuando se observan condiciones de mucha estocasticidad, tales perturbaciones podrían generar condiciones de servicio desfavorables, producto en gran medida de la irregularidad en los intervalos. Lo anterior se traduce inevitablemente en mayores tiempos de espera para los usuarios.

Con el objeto de remediar parcialmente estas irregularidades, los operadores pueden utilizar una variedad de estrategias de control en tiempo real que intentan mejorar la operación del sistema, en la mayoría de los casos, reduciendo la variabilidad de los intervalos; de estas, muy pocas han sido propiamente estudiadas para desarrollar políticas de control efectivas o para entender sus impactos en el rendimiento del sistema. Se puede mencionar por ejemplo, la estrategia de retención de vehículos o *holding*, que resulta ser directa de implementar y por ende, una de las más estudiadas. Autores como Eberlein (1995), Eberlein *et al.* (2001), Hickman (2001), y Sun & Hickman (2004) calculan tiempos de retención óptimos para cada bus bajo diversas condiciones y configuraciones, especificando en algunos casos estaciones de retención. Los objetivos que los autores apuntan en general a minimizar el tiempo total de espera o una combinación de éste con la demora de los usuarios a bordo de los vehículos retenidos.

Existe también otro grupo de estrategias para transporte público que se han utilizado tradicionalmente a nivel de planificación espacial y donde la dimensión temporal (tiempo real) pierde relevancia, y se diseña con valores agregados de demanda en días representativos y por periodos más largos de tiempo que en el caso de tomar acciones en tiempo real. Entre éstas, se pueden mencionar la estrategia *bucles*, estudiada por autores como Furth (1985) y Tirachini *et al.* (2010); Delle Site & Filippi (1998) añaden la característica de esquema multiperíodo a la operación en ciclo corto o bucle.

En otro trabajo, Tirachini (2007), muestra los beneficios de implementar este tipo de estrategia bajo condiciones de corredor aislado y demanda paramétrica, entregando como resultado expresiones óptimas de variables como frecuencia, tamaño de flota, capacidad del vehículo y sitios de origen/fin de aplicación de la estrategia, cuando se establece como función objetivo minimizar los costos tanto de operadores como de usuarios.

Recientemente, se han realizado estudios de estrategias combinadas de control predictivo aplicables a problemas de transporte público, entre ellos el trabajo de Sáez *et al.* (2010) establece un marco teórico de control predictivo híbrido para formular el problema de optimización en tiempo real, en caso de observarse demanda incierta mediante la aplicación de estrategias típicas de control en tiempo real, tales como retención de bus en paradero y salto de paradero. Una extensión interesante y directa es intentar adaptar algún tipo de estrategias comúnmente utilizadas en el contexto de planificación, para que tengan sentido en el contexto

de decisiones en tiempo real, e integrarlas al esquema de control propuesto por Sáez *et al.* (2010); se puede mencionar como una opción interesante la estrategia de inyección de buses en ciclo corto. La adaptación de esta estrategia al caso de tiempo real bajo condiciones de demanda que exceden los límites esperados, en un contexto de control predictivo, constituye uno de los aportes más importantes de este trabajo de tesis.

Así, en esta tesis se desarrolla modelos analíticos de control predictivo híbrido para representar y optimizar la operación de un corredor lineal de buses, considerando una combinación de las estrategias de retención de bus, salto de estación, inyección de buses y estrategia *bucles*. Las dos primeras tratadas en la literatura como herramienta de control en tiempo real, mientras que las dos últimas responden más a esquemas de planificación de flota, que aquí son adaptadas para que funcionen como estrategias de control en tiempo real.

Finalmente, el diseño de la estrategia de control predictivo se valida mediante simulación, utilizando una plataforma de microsimulación de tráfico, diseñada *ad-hoc* para representar adecuadamente la operación del transporte público

## **1.2 Objetivo general**

Diseñar e implementar estrategias de control predictivo híbrido para hacer eficiente la operación dinámica de un sistema de transporte público, utilizando esquemas de planificación de flota en conjunto con estrategias tradicionales de control en tiempo real.

## **1.3 Objetivos específicos**

- Formular un modelo analítico para representar un corredor de transporte público, incorporando estrategias de control, tales como retención de bus en paradero, salto de estación e inyección de buses en ciclo corto.
- Diseñar una estrategia integrando *bucles*, inyección de vehículos, retención o *holding* y salto de estación o *station skipping* en un contexto de control predictivo híbrido.
- Implementar el diseño de la estrategia de control predictivo mediante pruebas de simulación en un software de microsimulación de tráfico.
- Validar las estrategias de control predictivo evaluando sus indicadores de funcionamiento.
- Complementar un controlador experto simple existente con la estrategia de inyección de buses en ciclo corto y validarlo mediante simulación con el fin de compararlo con el diseño del controlador predictivo híbrido propuesto.

## **1.4 Contenido**

La motivación, objetivos y contenido de este trabajo de tesis, enfatizando la contribución de este trabajo se resumen en el presente capítulo.

El marco teórico que sustenta el desarrollo de esta tesis se presenta en el segundo capítulo, donde se sintetiza el estado del arte en el estudio de estrategias para transporte público: de retención o *holding*, de salto de estación o *station skipping*, estrategia *bucles* o en ciclo corto y

de inyección de vehículos. Además, se incluyen las principales características del microsimulador de tráfico escogido, PARAMICS (*PARAllel MICrosopic Simulation*), que fue utilizado para validar los diseños de los controladores experto simple y predictivo híbrido.

El tercer capítulo incluye la formulación de problema y las estrategias de solución, tales como: retención de bus, salto de estación e inyección de buses en ciclo corto. Mientras que en los capítulos cuarto y quinto se describen respectivamente los diseños de los controladores experto simple y predictivo híbrido que operan sobre el sistema de transporte público modelado.

El cuarto capítulo contiene el diseño de un controlador experto simple formulado por Pillajo *et al.* (2007) que incluye las estrategias de retención de bus y salto de estación, que se extendió a tres estrategias de control como acciones de control posibles. Esto, mediante la inclusión de la estrategia de inyección en buses en ciclo corto al diseño del controlador existente. De esta manera, el controlador experto simple es adaptado, con fines comparativos, con las mismas estrategias de control que se utilizan en el diseño de la estrategia de control propuesta.

El quinto capítulo contiene el principal aporte de este trabajo. Se trata del diseño de un controlador predictivo híbrido con estrategias dinámicas de retención de bus, salto de estación e inyección de buses en ciclo corto aplicables en tiempo real. El capítulo contiene como primera parte la adaptación de la estrategia de inyección de buses en ciclo corto a un esquema de controlador predictivo y el diseño del controlador predictivo híbrido, que comprende el modelo predictivo y la función objetivo, entre otros detalles. Finalmente, el método de solución se realiza mediante enumeración explícita.

Los diseños de los controladores experto simple y predictivo híbrido son codificados y adaptados para ser incluidos en el microsimulador de tráfico PARAMICS. En el sexto capítulo se describe el proceso de validación mediante simulación de cada diseño, que incluye principalmente las etapas de codificación para cada uno de los controladores, experto simple y predictivo híbrido.

El séptimo capítulo contiene el desarrollo de experimentos y resultados obtenidos de las simulaciones para cada escenario de experimentación definido. Los escenarios consideran un tipo de demanda (regular o incrementada) y un tipo de controlador. Los resultados de los experimentos contienen índices de desempeño apropiados para la validación de las estrategias, tales como tiempos de espera para el caso de los usuarios y costo de operación de flota para el caso de los operadores.



## 2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Estrategias de control de transporte

El objetivo de los operadores de transporte es entregar un buen servicio reflejado en el cumplimiento de una programación de flota, así como menores tiempos de espera y de viaje para los usuarios, sin dejar de lado el costo de operación del sistema. Para llevar a cabo estos objetivos se recurre a estrategias de control que son implementadas en la operación del sistema para mejorar el desempeño y por tanto el nivel de servicio entregado.

Entre los indicadores del nivel de servicio, la demora en paradero es de gran impacto entre los usuarios, este se cuantifica a través de la frecuencia en el servicio. Para servicios de alta frecuencia, los pasajeros se preocupan más por la regularidad del servicio que por la puntualidad del mismo, mientras que para servicios de baja frecuencia, los pasajeros valoran más la puntualidad, (Abkowitz & Engelstein, 1986).

El nivel de servicio entregado por el operador del sistema de transporte público se ve afectado constantemente por factores exógenos y endógenos. Entre los factores exógenos son recurrentes el clima y los incidentes y dentro de los endógenos la variación en las condiciones de tráfico; ambos factores dificultan el cumplimiento de la programación establecida *a priori*. Como consecuencia de estas aleatoriedades se produce un deterioro del nivel del servicio para los usuarios y también un costo adicional para los operadores.

Para solucionar muchos de estos problemas se diseñan diversas estrategias de transporte que varían en función del impacto que se produce sobre el sistema. Cuando el sistema es afectado recurrentemente, especialmente en horas *peak*, se prefiere las estrategias pre-planificadas, tales como operación en ciclo corto (*bucle*) mientras que en el caso de incidentes que se suscitan regularmente y afectan a la operación del sistema se prefiere estrategias de control en tiempo real, tales como retención o *holding* y salto de estación o *station skipping*; ambas estrategias definidas *on-line*.

Cuando existe información disponible en tiempo real respecto de la localización y del estado de los buses en el sistema, es factible que los operadores tomen decisiones asertivas sobre las medidas de control apropiadas para corregir los problemas en tiempo real.

Las estrategias de control, en general son diseñadas con el objetivo de beneficiar a los usuarios con menores tiempos de espera y/o a los operadores con menores costos operacionales. Un grupo de estas son definidas en tiempo real, generando las siguientes categorías (Eberlein, 1995):

*Control en estaciones:*

Estrategia de retención o *holding*

Estrategia de salto de estación: servicio expreso, *deadheading*, *bucles*, etc.

*Control en interestaciones:*

Estrategia de control de velocidad y programación preferente de semáforos.

*Otras:*

Estrategia de inyección de vehículos, separación de coches (trenes)

Dentro de este grupo de estrategias de transporte se escogen las siguientes:

1. La estrategia de retención o *holding*
2. La estrategia de salto de estación o *station skipping*, y
3. La estrategia *bucles* vista también como estrategia de inyección de vehículos o buses en este caso.

### **2.1.1 Estrategia de retención**

La estrategia de retención consiste en el retraso intencional de un vehículo en un paradero después del proceso de subida y bajada de pasajeros, con el objeto de cumplir con la programación de intervalos entre estaciones. La retención de buses en paraderos de control, bien elegidos para su aplicación, puede ayudar a mantener la separación deseada entre buses sucesivos, Chira-Chavala *et al.* (1999).

Muchas de las estrategias de retención consideran los dos tipos de costos, el de los operadores asociados a la mantención de la flota y el de los usuarios traducidos en tiempo de espera y tiempo de viaje. En algunos estudios sobre la estrategia de retención, los costos de los operadores no son considerados en la formulación del problema, aunque se reconoce que hay factores como el incumplimiento de la programación óptima que produce ineficiencia en el uso del personal y de la flota disponible, que se traducen en mayores costos para el operador. Ante esto, Jansson (1980) y Eberlein (1995) añaden que este efecto deseable de la estrategia podría ser despreciable por cuanto parte importante de los costos de los operadores corresponde al costo fijo asociado al trabajo.

Por el contrario, Hickman (2001) señala que las demoras en el servicio o alteraciones tienen un costo adicional para los operadores que representa entre 3% y 5% de los costos de operación y capital vehicular. En todo caso, algunos estudios han demostrado que con técnicas simples para mejorar el ruteo, programación y monitoreo de vehículos, es posible disminuir el costo de operación en más de un 10 % (Goeddel, 1996).

En cuanto al costo de los usuarios, en muchos estudios se incluye el tiempo de acceso, tiempo de espera y tiempo de viaje. El tiempo de acceso se ve excluido del costo cuando la ruta está definida y el tiempo que demoran los usuarios en llegar al paradero (tiempo de acceso) no se ve modificado y por tanto no representa una variable en el problema de optimización. En cuanto al tiempo de espera, Eberlein *et al.* (2001) incluyen este tiempo en la función objetivo respaldado en los estudios de los autores Kemp (1973) y Ben-Akiva & Lerman (1985) que demuestran que los usuarios del transporte son más sensibles al tiempo de espera que al tiempo

de viaje y admiten que la inclusión del tiempo en vehículo podría hacer que el problema sea intratable, por lo que deciden no incluirlo.

La estrategia de retención ha sido enfocada bajo diversos puntos de vista a lo largo de los últimos años. En los años 70, la estrategia de retención o *holding* fue estudiada con enfoques analíticos considerando rutas idealizadas con características de servicio estocástico. Este enfoque analítico se basa en políticas de umbrales óptimos (intervalos máximos) para redes muy simples. Se considera además información en tiempo real y se ignora los efectos de tiempo de espera en la variación del intervalo y restricciones en los tiempos de partida.

Los investigadores demostraron que el problema de retención es difícil de analizar y sugieren que los modelos analíticos no son muy útiles por su complejidad, aún para las formas más simples de estrategia *holding* y de sistemas de transporte idealizados. Es así como muchos análisis posteriores de la estrategia de retención basada en intervalo umbral y la estrategia de retención basada en la programación, que datan de los años 70's hasta los 90's se trataron usando simulación en vez de técnicas analíticas originando de esta manera un nuevo enfoque.

En los trabajos de Eberlein (1995), Eberlein *et al.* (2001), Hickman (2001), Sun & Hickman (2004), se menciona que la estrategia de retención bajo este nuevo enfoque se caracteriza porque los modelos desarrollados permiten determinar tiempos óptimos de retención para cada vehículo por separado.

El objetivo es minimizar la demora total de los pasajeros medida a través del tiempo de espera de los pasajeros a bordo en vehículo y de los que esperan en los paraderos aguas abajo. Cabe mencionar que para vehículos con alta frecuencia de servicio, la regularidad de intervalos llega a ser un factor primordial en la minimización del tiempo de espera de pasajeros; es aquí donde la estrategia de retención se enfrenta al problema de ajustar los intervalos de los vehículos para minimizar la variabilidad en los intervalos.

Un elemento importante para la aplicación de la estrategia de retención en tiempo real es la incorporación de las tecnologías AVL (*Automatic Vehicle Location*) y APC (*Automated Passenger Counting*), estas tecnologías permiten obtener información en tiempo real de la ubicación de vehículos y son incorporadas por algunos autores en sus trabajos de investigación. Por citar un ejemplo, Hall *et al.* (1997) probó varias opciones de retención de un vehículo con y sin información en tiempo real a través de simulaciones. Como resultado reportaron que la opción que considera el despacho del vehículo en tiempo real produce menores demoras para los usuarios y menores tiempos de espera.

Un tema de discusión es la ventaja de la aplicación de la estrategia de retención en múltiples estaciones de control sobre una sola estación. Autores como Eberlein, *et al.* (2001) establecen comparaciones de los beneficios de los vehículos retenidos en múltiples estaciones de control y concluyen que retener un vehículo en más de una estación de control no muestra una ventaja significativa; conclusión a la que llegan usando un ejemplo numérico basado en una ruta de transporte real. Por otro lado, Sun & Hickman (2005) en su trabajo de investigación concluyen que la estrategia de retención con múltiples estaciones ofrece más oportunidades para regularizar los intervalos de vehículos, así también, el costo total de pasajeros con múltiples estaciones de retención puede ser reducido, tanto como el costo asociado a la estrategia en una

estación de retención. Ciertamente, el hecho de rechazar la retención en múltiples estaciones depende de que la operación de transporte esté sujeta a un cierto nivel de variabilidad.

Además, Liu (1995), aconseja que las estaciones de control debieran ser aquellas en las cuales el número de pasajeros en espera de un bus aguas abajo sea dominante sobre el número de pasajeros a bordo del bus. Otra consideración al respecto, se presenta el trabajo de Abkowitz *et al.* (1986) en el cual se concluye que la reducción en la variación en el intervalo en estaciones aguas abajo del punto de control no es uniforme y que el máximo beneficio de la estrategia de control le corresponde a los pasajeros en paradero inmediatamente aguas abajo del punto de control y aquellos paraderos que están lejos del punto de control podrían no ser afectados significativamente. Respecto al número de paraderos de control, Chira-Chavala *et al.* (1999) mencionan que el número óptimo es escogido considerando un *trade-off* entre la demora incurrida por los pasajeros abordo del bus y los pasajeros esperando en el paradero aguas abajo respecto de la posición de dicho bus.

De este grupo de estrategias de retención, hay dos que son de interés para este trabajo de investigación; aquella basada en el intervalo y la que se fundamenta en el vehículo precedente - antecesor ("*Pre-Fol*" *Vehicle Holding*), aplicables a ciudades de tamaño intermedio. Abkowitz & Tozzi (1986) concluyen que la retención basada en el intervalo opera mejor en rutas en las cuales el número de pasajeros a bordo en los paraderos iniciales es relativamente menor y existe un mayor número de pasajeros que aborden un bus en la mitad de la ruta y desciendan al final. Un ejemplo de este fenómeno se presenta en rutas en horario *peak*, cuyo recorrido empieza en un centro atractor de viajes, *CBD (Central Business District)* y termina en las afueras del distrito. La estrategia del segundo tipo, se aplica comúnmente cuando se presenta el fenómeno de apilamiento o *bunching* entre buses a lo largo de una ruta. La retención del bus en un paradero de control considera el intervalo del bus anterior y el intervalo del bus siguiente con respecto al bus detenido en paradero, así como también el lapso de tiempo que el bus previo fue retenido y la proporción de pasajeros demorados, Chira-Chavala *et al.* (1999) y Blume (1980).

Autores como Sáez *et al.* (2009) y Pillajo *et al.* (2007) utilizan la retención basada en los vehículos precedente y antecesor para el diseño de un controlador difuso y experto simple respectivamente, que considera la localización de los buses aguas abajo y aguas arriba para decidir una acción de control en tiempo real. El tiempo de retención del vehículo previo es un elemento importante a considerar para que los buses no sean retrasados continuamente a tal punto que la programación diaria no se distorsione y para lograr una distribución de intervalos uniforme.

La retención de tipo "*pre-fol*" en general requiere información acerca de la localización y del estado de todos los buses operando en la ruta. Por tanto, el uso de AVL (*Automatic Vehicle Location*) resulta de gran utilidad para obtener información en línea sobre los patrones de subida y bajada de pasajeros a lo largo de la ruta, por sentido y día, así como también el número de puntos de control y la desviación en la programación de vehículos sucesivos. La magnitud de la correlación de intervalos entre buses sucesivos influye en el beneficio de este tipo de retención.

Así, el máximo beneficio ocurre cuando los intervalos están correlacionados de forma inversa, es decir, un intervalo corto estará seguido siempre por un intervalo largo, con igual desviación

que el intervalo programado. Senevirante (1990) reporta que la retención de un vehículo funciona mejor si los puntos de control cambian en cada patrón de viaje, dependiendo de las condiciones de tráfico prevalecientes, así como de los patrones de subida y bajada de los usuarios a lo largo de la ruta y de la desviación de la programación de otros buses.

De la revisión bibliográfica presentada, se concluye que la estrategia de retención indudablemente mejora el nivel del servicio en la operación del sistema de transporte, disminuyendo la varianza del intervalo entre vehículos, la desviación en la programación y además reduciendo el costo de los usuarios. Todo esto basado en una adecuada ubicación de los puntos de control y en un número óptimo de estaciones de control.

### **2.1.2 Estrategia de salto de estación**

La estrategia de salto de estación generalmente se aplica cuando el efecto *bunching* es inminente y el operador del sistema obliga a un bus a saltar una estación para crear una separación inmediata entre dos buses. A través del salto de estaciones se logra eliminar la demora por detención en paraderos y el vehículo puede recuperar parte del retraso en la programación. De esta manera, se procura minimizar el tiempo de espera total, considerando generalmente el tiempo extra de espera de aquellos usuarios que fueron saltados.

En la literatura la estrategia de salto de estación es vista como una estrategia pre-planificada (Jordan & Turnquist, 1979; Furth, 1986) pero también como estrategia de control en tiempo real (Lin *et al.*, 1995; Eberlein, 1995; Eberlein *et al.*, 1999; Fu & Liu, 2003; Sun & Hickman, 2005).

La estrategia de salto de estación es aplicada a nivel de planificación con el fin de igualar la carga de pasajeros y minimizar el requerimiento de tamaño de flota y a nivel operacional para cumplir con la programación y regularizar intervalos de salida de vehículos desde paradero. La desventaja de la estrategia de salto de estación está relacionada con la pérdida de servicio para cierto porcentaje de pasajeros; especialmente cuando ésta es implementada con propósitos de control de operación. Por esta razón, la estrategia de salto de estación es usualmente considerada más formalmente en el proceso de planificación que en el control de operaciones.

Es de interés la estrategia de salto de estación en tiempo real, porque el objetivo es apresurar a los buses por medio de salto de estaciones (una o más) para recuperar su horario planificado y de esta manera reducir el impacto en el nivel de servicio medido. Frecuentemente, el nivel de servicio se valora a través del tiempo de espera total de los usuarios en las estaciones más el tiempo de espera extra de los usuarios que han sido saltados.

Los autores Li *et al.* (1991), Lin *et al.* (1995) y Fu & Liu (2003) formularon el problema de retención y salto en tiempo real como un problema de decisión durante el despacho de vehículo desde el terminal. En estos estudios se asume principalmente que tan pronto como el vehículo es despachado desde el terminal, los paraderos predefinidos para salto (o segmentos de salto) no pueden ser cambiados.

En este sentido, la aplicación del control de retención y salto de estación no es completamente en tiempo real, por cuanto la acción de control no es adaptiva a cambios durante la operación

una vez que el vehículo está en la ruta. Esto limita enormemente la ventaja que puede ser ofrecida por el avance en la tecnología de la información, AVL y sistemas de monitoreo, especialmente cuando las condiciones de operación de la ruta están sujetas a variaciones significativas. Más aún los métodos en estos estudios no pueden ser fácilmente implementados para responder a interrupciones de vehículos de manera rápida, desde que el control de detención y salto pueden ser decididos mientras los vehículos están siendo despachados desde el terminal.

Li *et al.* (1991) formularon un modelo de programación estocástico para resolver el problema de control en tiempo real con salto de estación, en el cual la función objetivo incluye la minimización de la desviación de la programación en la ruta y la demanda insatisfecha de pasajeros.

Lin *et al.* (1995) investigaron la estrategia combinada de retención y salto de estación y concluyen que debería evitarse un control tan riguroso de esta combinación porque podría incrementar el tiempo de espera total de todos los pasajeros.

En una investigación realizada por Eberlein (1995), el problema de retención y salto de estación es formulado como un modelo de programación no lineal entero para decidir que vehículo salta que paradero o estación. En este modelo la decisión del problema es determinar los paraderos de inicio y fin del segmento a ser saltado (segmento expreso).

Más recientemente, Fu & Liu (2003) describen una nueva estrategia dinámica de programación que busca óptimamente balancear los beneficios del operador y de los usuarios.

En este estudio el objetivo es nuevamente formularlo como un problema de programación entero, similar al definido por Li *et al.* (1991), el cual puede ser resuelto. Un análisis de sensibilidad realizado en este trabajo indica que la retención y salto de estación puede ser más efectiva en el contexto de alta demanda de pasajeros e intervalos pequeños a lo largo de la ruta. También esto sólo debería ser usado cuando exista una apropiada variación de tiempo de viaje en la ruta.

En general, la decisión de saltar una estación se toma antes de que los buses partan del terminal, excepto en el modelo de Sun & Hickman (2005) que levantan el supuesto anterior e implementan la estrategia de control de retención y salto en tiempo real, de esta manera el control puede ser aplicado en situaciones más generales y adaptarse a las condiciones de operación a través del ajuste del número y localizaciones de los paraderos a ser saltados en tiempo real. Específicamente, los autores consideran que la primera y última estación del segmento saltado puede ser variable, encontrando muchas situaciones en la cual la estrategia permite la detención de buses en las estaciones de salto si es que hay pasajeros que deseen bajar allí.

### **2.1.3 Estrategia de inyección de buses y estrategia *bucles***

La estrategia de inyección de buses y la estrategia *bucles* (operación en ciclo corto) inicialmente fueron estudiadas como estrategias independientes.

La estrategia de inyección de buses es útil cuando un bus está demorado y causa grandes tiempos de espera a los usuarios y ninguna medida de corrección es efectiva. En estas circunstancias, un bus adicional puede ser despachado para ayudar a recuperar la desviación en la programación del bus demorado. El bus adicional debe ser inyectado delante del bus atrasado para absorber esa demanda; así como también puede terminar su recorrido cuando el bus demorado retorne a su programación o termine su servicio.

La estrategia *bucles* consiste en un sistema con dos patrones de servicio en el cual la línea que opera en ciclo corto es enteramente traslapada por la línea de recorrido completo. El patrón en ciclo corto cubre la parte más cargada del corredor. La estrategia puede ser extendida para incluir más de dos patrones de servicio. Los patrones o recorridos pueden tener el mismo término; por ejemplo al extremo final del corredor con retornos a diferentes distancias o retornos en ambos extremos. Esta estrategia puede ser vista como un mecanismo de gestión de flota. Es decir permite operar de forma eficiente porque al operar en ciclos cortos se requiere menos viajes y consecuentemente menos vehículos en servicio lo que se traduce en menores costos para los operadores.

La estrategia *bucles* se implementa cuando los patrones de viajes origen-destino muestran un comportamiento inusual, observándose una variación del volumen de viajes, ya sea temporal o espacial, que no fueron considerados en la programación de operación de la flota existente. La estrategia *bucles* en su gran mayoría ha sido enfocada como estrategia de planificación y muy poco en el contexto de estrategia de control.

El diseño de esta estrategia ha sido estudiado por autores como Furth (1988), Vijayaraghavan (1988), Ceder (1989), Vijayaraghavan & Anantharamaiah (1995). El diseño queda definido con la determinación de paraderos de inicio y fin del ciclo corto y con la programación del recorrido, tamaño y frecuencia de cada flota. Un aspecto importante en el diseño es balancear la carga de pasajeros en la zona compartida y las frecuencias de cada flota; Furth (1986) en su trabajo determina un desfase óptimo que cumple con estos requerimientos y las variables de diseño escogidas minimizan el tamaño de flota total y el tiempo de espera de pasajeros en el sistema. Para lograr establecer este diseño, el autor recurre a separar la demanda de viajes por tipo de mercado, es decir un mercado compartido que corresponde a la demanda de la zona donde operan ambas flotas y otro mercado completo que es atendido por la flota que opera el corredor completo. Este diseño es útil a nivel de planificación porque se parte de una matriz de viajes origen-destino conocida a priori y mientras los volúmenes de demanda no excedan a los de diseño, el tamaño de flota en operación resulta suficiente.

Para operar con la estrategia *bucles* se cuenta con dos flotas que trabajan en forma simultánea a lo largo del corredor de buses. Tirachini *et al.* (2010) muestra de forma gráfica la operación conjunta de las flotas en la Figura 2.1. La flota de buses que opera en el sistema puede dividirse en dos grupos; los que sirven al corredor completo con frecuencia  $f_a$  y los que operan con estrategia, con frecuencia  $f_b$ . A los pasajeros que esperan en paradero y que son servidos por ambas flotas les corresponde la suma de las frecuencias de dichas flotas.

Los paraderos de inicio y fin del servicio que opera con estrategia son  $S_0$  y  $S_1$  respectivamente en el caso del sentido 1 mientras que en el sentido contrario (sentido 2) el paradero  $S_1$  corresponde al paradero de inicio y  $S_0$  el paradero final.

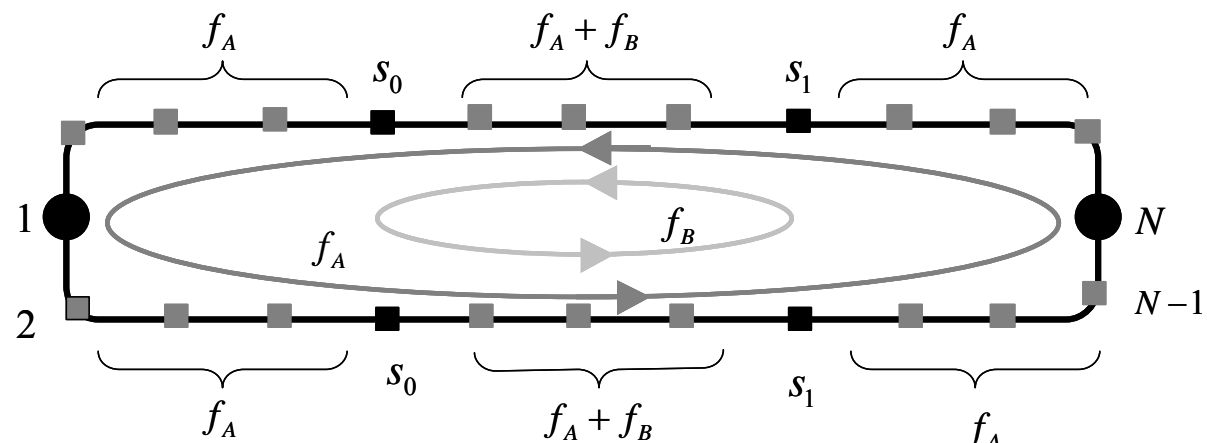


Figura 2.1. Corredor de transporte público con estrategia bucles  
Fuente: Tirachini *et al.* (2010)

La estrategia de ciclo corto e inyección de buses se analiza bajo dos enfoques; la estrategia *bucles* sin inyección de buses y con inyección de buses.

### Estrategia bucles sin inyección de buses

La estrategia *bucles* sin inyección de buses es particularmente empleada en sistemas de transporte público, que a través de una programación ajustada, busca reducir el número de vehículos requeridos. El beneficio se alcanza por mayor capacidad empleada de buses y bajos costos de capital y de operación. Los pasajeros que no son servidos por la línea de ciclo corto incrementan su tiempo de espera, mientras aquellos que pueden escoger entre los buses que operan en el corredor completo y el ciclo corto, no cambian su nivel de servicio. El uso del tamaño de vehículo como variable en lugar de capacidad fija provee una alternativa adicional en el diseño del servicio por cuanto provee un ahorro en los costos operacionales de flota.

Una variable de diseño relevante en la estrategia *bucles* constituye la frecuencia de los buses que operan en ciclo corto, es así como Dell Site & Filippi (1998) y Furth (1988) proponen que la frecuencia de los buses que operan en el bucle sea un valor múltiplo de aquellos que operan el corredor completo (*scheduling mode*).

Furth (1988) incorpora el factor  $n$ , *scheduling mode*, en el diseño de la estrategia *bucles* a nivel de planificación. Donde, la frecuencia de buses  $f_b$  que operan en ciclo (buses b) que es un múltiplo  $n$  de la frecuencia  $f_a$  de buses que recorren el corredor completo (buses a) y está dada por la siguiente expresión:

$$f_b = n f_a \quad (2.1)$$



El autor también emplea en su diseño la variable desfase que se refiere al intervalo entre un viaje en corredor completo y el viaje precedente en ciclo corto y dice que éste debe ser determinado de manera de uniformizar la carga o número de pasajeros en el interior del vehículo. Es así como el desfase óptimo relativo balancea las cargas de pasajeros de las flotas que operan en la zona compartida (ciclo corto) y garantiza que ambas flotas alternen en la operación al interior del ciclo corto.

Una propuesta novedosa constituye el uso de *interlining* en la operación de la flota de buses, se refiere específicamente a la conexión de varias rutas o recorridos servidos por un vehículo, pudiendo así reducir el tamaño de flota. Esta operación podría extenderse a casos de sistemas más complejos de buses que operan en corredores radiales, haciendo que un bus opere varias rutas interconectadas. Furth (1988) considera el uso de *interlining* para minimizar costos y utiliza un modelo de sistema de transporte caracterizado por un centro atractor de viajes que está localizado en uno de los límites del ciclo corto mientras que el otro límite es considerado como una variable de decisión. Se utiliza la partición de la demanda por tipo de mercado, entendiéndose por mercado al grupo de usuarios servidos. Por un lado, existe un mercado compartido donde operan ambas flotas y por otro el mercado completo que sirve exclusivamente la flota  $F_a$  que recorre el corredor completo.

Furth (1988) y Ceder (1989) formularon un problema de diseño óptimo donde la metodología utilizada provee el mínimo de flota requerida y la variable de decisión es el intervalo; tan sólo Furth (1988) incluye también el tamaño de vehículo como variable de decisión.

En el procedimiento propuesto por Ceder (1989), la asignación de buses para el mejoramiento del nivel de servicio es realizada a través de un paso adicional, donde el número de viajes en ciclo corto es minimizado, manteniendo el tamaño mínimo de flota calculada. Mientras que en el enfoque propuesto por Furth (1988), la búsqueda por un *trade-off* óptimo entre tamaño de flota y tiempo de espera puede ser alcanzado sólo por la comparación de valores obtenidos con diferentes combinaciones de parámetros de diseño factibles. En cuanto al comportamiento de pasajeros, el enfoque de Ceder considera volúmenes y capacidades agregadas mientras que Furth incluye un modelo de cargas entregadas en los dos patrones (en ciclo corto y en corredor completo) sólo en el caso de arribo regular de buses. Adicionalmente, los modelos de optimización mencionados de Ceder (1989) y Furth (1988) utilizan simplificaciones, tales como demanda constante con la implicación de que ésta es insensible al nivel de servicio y tarifa y por otro lado con un análisis restringido a un único periodo de operación.

En cambio los autores Delle Site & Filippi (1998) plantearon una estrategia de optimización del servicio para un corredor de buses que opera en ciclo corto con tamaño de vehículo variable. El objetivo de la estrategia es la maximización del beneficio (minimización del costo total) considerando que la red se limita a dos líneas y su función objetivo es capaz de separarse por línea. Incluyen en la formulación un modelo del comportamiento de los pasajeros que entrega las cargas en ambas líneas, así como el tiempo de espera promedio en ambos casos.

### **Estrategia *bucles* con inyección de buses**

La combinación de estrategias, de inyección de buses y *bucles* se aplica cuando se cuenta con información en tiempo real y cuando existen demoras de gran magnitud. Los sistemas

inteligentes de transporte entregan información para que los operadores tomen decisiones *on-line* respecto a operación de la flota, considerando a los paraderos como puntos de control. Las grandes demoras están relacionadas frecuentemente con incidentes fortuitos que ocurren en la operación del sistema, como los provocados por un vehículo averiado, algún accidente de tráfico, construcción en la vía, eventos con gran afluencia de usuarios, entre otros.

Vijayaraghavan (1988) y Vijayaraghavan & Anantharamaiah (1995) proveen una metodología para reducir el requerimiento de flota en una ruta de bus incorporando viajes en ciclo corto, considerando como variable de entrada, el intervalo. De esta manera también se logra ajustar la flota a la programación planificada. En el trabajo de Vijayaraghavan & Anantharamaiah (1995) se aplicó la inyección de servicios expresos y servicios parciales en una ruta urbana en Madras (India), caracterizada por un patrón de demanda, que difiere por sentido del corredor. En este caso, la estrategia logró reducir el tamaño de flota pese a la limitación de la velocidad de operación de buses en el corredor.

#### **2.1.4 Estrategias de control combinadas**

Las estrategias de retención, salto de estación, *bucles* e inyección de buses, ahora son combinadas en diseños de estrategias de control más complejos.

##### *Retención de vehículos, deadheading y servicios expresos*

Eberlein (1995) y Eberlein *et al.* (1999) proponen un grupo de modelos para examinar simultáneamente las estrategias de retención de vehículos, *deadheading* (salto en un segmento de ruta) y servicios expresos (*expressing*). Los autores reconocen que las estrategias de salto de estaciones (*deadheading*, servicios expresos) y retención tienen objetivos contrapuestos (acelerar y retener, respectivamente), por tanto no deberían aplicarse al mismo tiempo, porque su implementación sería difícil de entender por los pasajeros. Por el contrario, en Sáez *et al.* (2010) se combinan las acciones de control de retención y salto de estación con resultados favorables, por cuanto mejoran la regularidad de los intervalos entre pasadas sucesivas de buses en paraderos y de esta manera disminuyen los tiempos de espera de los usuarios. Este último hecho es respaldado por Osuna & Newell (1972) que demuestran que mantener un intervalo regular entre pasadas de buses permite reducir los tiempos de espera en paraderos.

Respecto a las estrategias abordadas separadamente, los resultados muestran que la estrategia de retención es usada con mayor frecuencia que la de salto de estación, es decir es más efectiva en la mayoría de los casos, ya que tiene menos efectos negativos en los usuarios, algunos de los cuales ven fuertemente incrementado su tiempo de espera cuando su estación es saltada por un vehículo que realiza *deadheading* o un servicio expreso, lo cual además les produce frustración. Sáez *et al.* (2010) y Cortés *et al.* (2010) plantean una estrategia de control predictiva aplicable al sistema de transporte público de superficie que incluye las estrategias de retención y salto de estación con demanda incierta la cual es modelada como una perturbación al sistema.

La función objetivo que se plantea es la de minimizar el costo de los usuarios traducido en tiempos de espera. En Cortés *et al.* (2010) se extiende el análisis para una función objetivo que beneficia tanto a los usuarios como los operadores, vista como mono-objetivo y otra como multi-objetivo. El problema de optimización en ambos casos se resuelve usando algoritmo

genético por la alta complejidad y solo en el caso del trabajo de Sáez *et al.* (2010) es comparado con un diseño de control experto simple con estrategias de retención y salto.

#### *Estrategia bucles y retención de vehículos*

O'Dell & Wilson (1999) y Shen & Wilson (2001) realizan estudios de la aplicación integrada en tiempo real de las estrategias *bucles* y retención de vehículos en sistemas de trenes para minimizar el efecto de una interrupción causada por algún incidente, esto a través de un servicio optimizado de buses.

El objetivo que plantean es minimizar ya sea el tiempo de espera de los pasajeros o la suma ponderada de éste y la demora adicional en vehículo, tomando en cuenta la restricción de capacidad de los trenes, es decir, la posibilidad de que los pasajeros no puedan subir a los vagones porque estos están llenos. En general los resultados muestran que la estrategia de retención de vehículos por sí sola disminuye en forma importante el tiempo de espera de los usuarios, mientras que la implementación complementaria de la estrategia *bucles* es útil si el tiempo de bloqueo es mayor que el tiempo del ciclo corto y si las estaciones fuera de este ciclo corto son pocas.

#### *Estrategia integrada, deadheading-bucles*

Este tipo de estrategia es propuesta por Tirachini & Cortés (2007), ante la necesidad de combinar las estrategias *deadheading* y *bucles* para aplicarlos a casos más reales como corredores de transporte público, donde en un sentido la demanda es superior al otro; pero además se observan concentraciones en zonas específicas, que podrían incluso no coincidir entre los dos sentidos de operación, es decir, situaciones “mixtas” en las cuales no es claro el predominio de alguna de ellas. El objetivo del trabajo en mención es obtener variables óptimas de frecuencia, tamaño de flota que minimice tanto costo de operadores como el de los usuarios.

#### *Estrategias de retención, salto y de prioridad en semáforos*

Otárola (2008) integra las estrategias de retención y salto de estación con una estrategia de control en semáforos. Estas estrategias modeladas en conjunto bajo un esquema de control predictivo tienen por objeto minimizar los tiempos de espera en paraderos y demoras en semáforos de los usuarios de transporte público y privado respectivamente. La estrategia integrada de control genera resultados promisorios para los usuarios de transporte público porque disminuye los tiempos de espera en paraderos y para los usuarios del transporte público y privado por la disminución de demoras en semáforos. El autor recomienda no usar un horizonte predicción amplio, por cuanto no se reduciría mucho los tiempos de espera y demoras, pero sin duda alguna los tiempos de ejecución se verían incrementados.

Recientemente, los diseños de estrategias de control se validan en algunos casos mediante experiencias reales, sin embargo, empieza a tomar relevancia una herramienta alternativa útil de experimentación, como es el caso de los microsimuladores de tráfico. Por la ventaja de tiempo y costo computacional, los microsimuladores de tráfico se convierten en un medio atractivo de representación del comportamiento del sistema de transporte bajo condiciones específicas de operación y por esta razón se decide, en este trabajo de investigación, utilizarlo para validar el diseño del controlador predictivo híbrido propuesto y el diseño del controlador experto simple.

A continuación se realiza un estudio del arte de algunos microsimuladores de tráfico de interés y sus principales características.

## **2.2 Microsimuladores de tráfico**

Los microsimuladores de tráfico son utilizados para evaluar proyectos de intervención vial y de gestión de tráfico. Ejemplos de software comerciales de este tipo son: VISSIM, AIMSUM/2, CORSIM, DRACULA y PARAMICS. Una revisión detallada de las principales características de los software mencionados se presenta en Cortés *et al.* (2010).

Los microsimuladores se basan en modelos microscópicos de tráfico, capaces de representar corrientes de tráfico con alto grado de detalle, tales como redes urbanas, carreteras o una combinación de ambas. Específicamente, utilizan modelos de seguimiento vehicular, cambio de pista, aceptación de brecha y en algunos casos modelos de amabilidad y agresividad de los conductores.

La modelación puede ser efectuada de manera discreta o continua, así como la asignación de los vehículos a la red puede ser efectuada a intervalos constantes o aleatorios, los semáforos pueden tener programación fija o variable y los vehículos pueden ser de diversos tipos (autos, buses, camiones, otros) incluso es posible modelar el comportamiento de los peatones. La ruta de los vehículos puede estar predeterminada o variable, dependiendo de las condiciones de tráfico en la red.

Las diferencias entre los modelos de microsimulación que existen han sido ampliamente estudiadas, por ejemplo, en el proyecto SMARTTEST (*Simulation Modelling Applied to Road Transport European Scheme Tests*) se analizan 32 microsimuladores de tráfico (SMARTTEST, 1999). A pesar del número de estudios realizados, son pocos los que describen la simulación de vehículos de transporte público y su efecto sobre el resto del tráfico, entre ellos, Jayakrishnan *et al.* (2003).

La gran mayoría de los microsimuladores han sido creados para modelar principalmente el comportamiento del transporte privado con muy poca atención en el transporte público, lo que constituye una limitación importante. Estos modelos han sido desarrollados en países industrializados, donde el transporte público pierde relevancia frente al transporte privado y por ello, simplifican la representación de los buses y sus operaciones, tratándolos en muchos casos como autos largos que se detienen a lo largo de una ruta predeterminada (Silva, 2000). La representación de otros fenómenos importantes como el tiempo de detención de buses en paradero o la llegada de pasajeros al andén de un paradero no es efectuada en forma completa en los microsimuladores.

Los microsimuladores que incorporan el transporte público en algunos modelos microscópicos de tráfico son los siguientes: AIMSUM (TSS, 2004), CORSIM (FHWA, 1996), DRACULA (Liu, 2003), PARAMICS (Quadstone, 2003) y VISSIM (PTV, 2003). Las características de los vehículos que pueden ser modeladas en los microsimuladores se enfoca en la capacidad de los vehículos, generación y asignación de ellos a la red, uso exclusivo de pista para el transporte

público, modelación en paraderos y la capacidad de incorporar aplicaciones externas, Cortés *et al.* (2010).

La capacidad de los vehículos de transporte público es una característica importante que sólo es considerada en PARAMICS y VISSIM. En servicios que son de alta demanda, esta característica puede influir, por ejemplo en el tiempo de espera de los pasajeros, cuando en periodo punta los vehículos sólo pueden atender a parte de la demanda que espera en paradero.

En AIMSUM, los vehículos de transporte público pueden ser generados y asignados a la red a intervalos constantes o siguiendo un horario predefinido. La frecuencia u horarios de salida deben ser indicados en tablas horarias. La generación de vehículos de transporte público en PARAMICS se efectúa según una frecuencia fija o un horario de salida preestablecido.

Una limitación adicional de los microsimuladores tiene que ver con la modelación de la interacción entre los vehículos de transporte público y el resto del tráfico. Para dar facilidades al desplazamiento de los vehículos de transporte público se puede modelar pistas de uso exclusivo. En AIMSUM, CORSIM, DRACULA, PARAMICS y VISSIM se modela pista de uso exclusivo para transporte público con diferencias puntuales que pueden ser consultadas por el lector en Cortés *et al.* (2010).

Respecto a la modelación de paraderos; AIMSUM, DRACULA y VISSIM pueden modelar dos tipos de paraderos; uno ubicado en una pista de la vía y otro fuera de ella, en una bahía para buses, mientras que CORSIM y PARAMICS sólo modelan paraderos tradicionales. Si el paradero se ubica en alguna pista de la vía, los buses bloquean el resto del tráfico cuando se detienen y por lo tanto, los vehículos deben adelantarlos si hay más de una pista o esperan en cola si no las hay. En cambio, cuando los buses se detienen en una bahía, no interrumpen el flujo del arco. En PARAMICS, los paraderos están asignados a un servicio o ruta en particular y los vehículos se detendrán en todos los paraderos que se les han asignados.

Para superar algunas de las limitaciones de los modelos o personalizar su funcionamiento, el usuario puede incorporar sus propios programas o aplicaciones externas a través de interfaces especiales conocidas como API (*Application Programming Interface*), excepto en DRACULA.

Entre los software de microsimulación revisados, el PARAMICS (*PARAllel MICroscopic Simulation*) presenta características más atractivas para el desarrollo de una aplicación externa que contenga el diseño de la estrategia de control como la que se propone en este trabajo.

### **2.2.1 Microsimulador PARAMICS**

PARAMICS (*PARAllel MICroscopic Simulation*), es un programa computacional utilizado para modelar en detalle una red de tráfico y las trayectorias en el tiempo y espacio de cada uno de los vehículos que circulan en la red. Una red de tráfico en general está representada por medio de arcos (vías) y nodos o conectores (intersecciones). La red de tráfico que se utiliza en un microsimulador debe estar previamente calibrada. La calibración de una red de tráfico es un proceso iterativo que consta de las siguientes etapas: codificación de la red, construcción de la matriz de demanda, selección de un modelo de elección de ruta apropiado y asignación de

valores a los parámetros de costo generalizado para cada arco. Se dice que una red de tráfico está calibrada cuando los resultados entregados por el modelo luego de la simulación se ajustan a los datos observados, flujo en arcos, tiempos de viaje, longitud de colas, velocidades, entre otros.

El software PARAMICS se encuentra dividido en varios módulos independientes como son: *Modeller*, *Programmer*, *Processor*, *Analyser*, *Converter*, *Designer*, *Estimator*, *Processor Node*. Entre ellos para modelar una aplicación vía API, se utiliza los módulos, *Modeller* para crear la red de tráfico, *Programmer* para crear el código que contiene el modelo a simular y *Processor* para correr varias simulaciones en menor tiempo. *Modeller* es el principal componente de PARAMICS y posee una interfaz gráfica para visualizar en 2 y 3 dimensiones. Los datos básicos que recibe son: la topología de la red, la demanda de viajes, las características de los vehículos y los parámetros para los modelos.

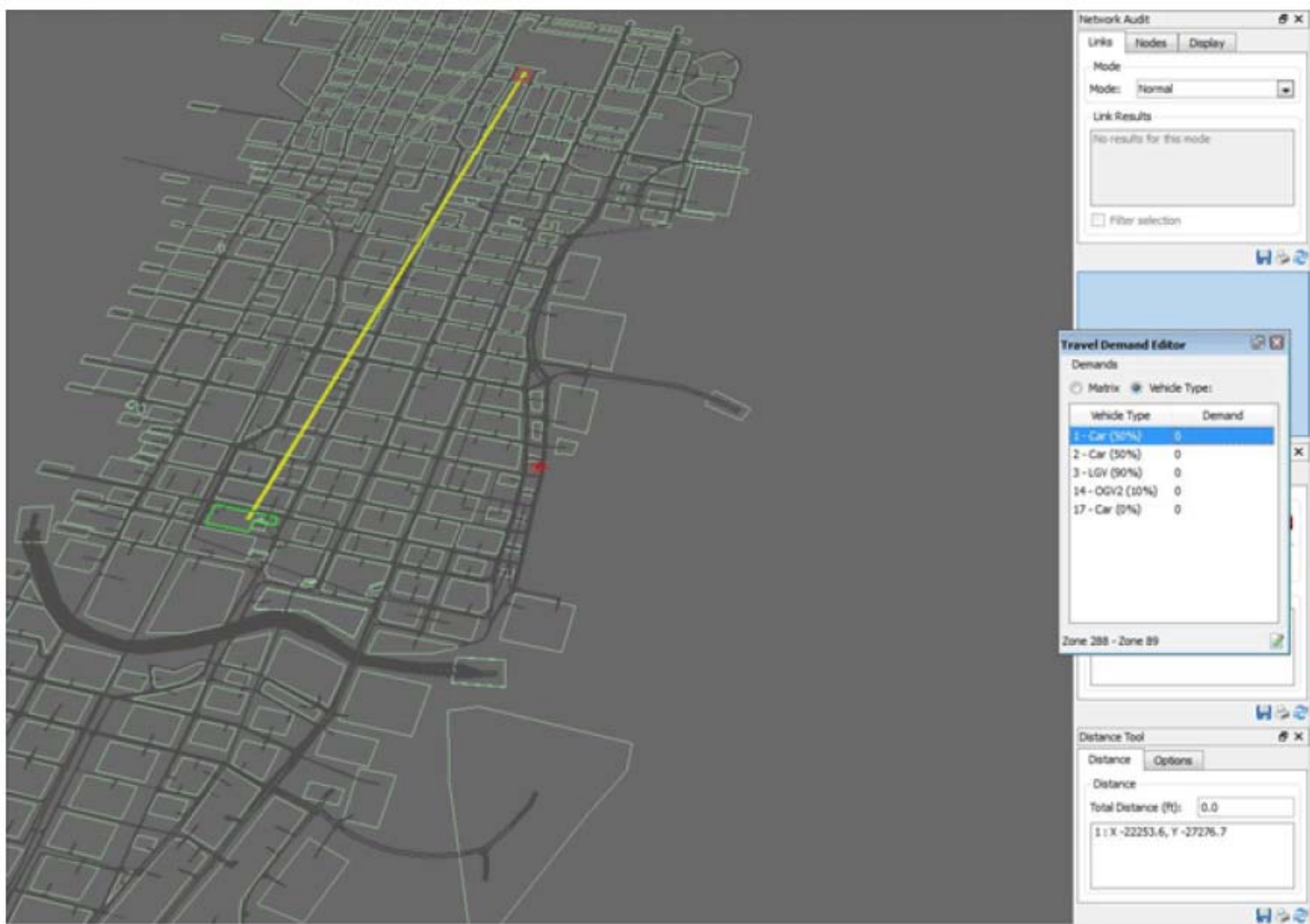


Figura 2.2. Representación de una red de tráfico en el Módulo Modeller de PARAMICS  
Fuente: Modeller User Manual, Paramics v6.

Este módulo simula el movimiento de los vehículos a través de modelos de cambio de pista y seguimiento vehicular. Las vías son modeladas a través de arcos de una o más pistas que describen la geometría de la vía y unen los nodos (representación de intersecciones en su mayoría). Las intersecciones pueden ser de prioridad o estar reguladas con semáforos de tiempo fijo o variable. La demanda (viajes entre zonas) está representada a través de una matriz origen-destino. Las principales características físicas de los vehículos son: longitud, peso, altura, ancho, velocidad máxima, tasas de aceleración y frenado.

El módulo que sirve de base para la creación de un código es el *Programmer* que es una librería de funciones que permite al usuario una interacción directa entre un programa externo y el microsimulador. Este es capaz de obtener y/o entregar datos a la simulación en tiempo real o modificar los modelos internos del programa. El detalle de las funciones disponibles de programación del microsimulador PARAMICS, se describen en Quadstone (2003).

PARAMICS es uno de los microsimuladores comerciales de tráfico que más profundiza en la representación de las operaciones del transporte público, sin embargo no logra modelar con igual detalle como lo hace con el transporte privado. Para superar algunas de estas limitaciones se crea el plugin: MISTRANSIT (*Microscopic Simulation of TRANSIT*) que modela gran parte de los detalles operacionales de transporte público en forma más realista. Una explicación más detallada sobre la versión original de MISTRANSIT y su interacción con PARAMICS se pueden encontrar en Fernández *et al.* (2010).

### **2.2.2 Herramienta de modelación MISTRANSIT**

MISTRANSIT es un software creado para modelar aspectos puntuales y operaciones que no fueron concebidos en PARAMICS, tales como, modelación de paraderos, buses, terminales de transbordo, análisis de prioridades al transporte público de superficie en arcos e intersecciones, Fernández *et al.* (2010). La herramienta API (*Application Programming Interface*) es la que permite manipular el comportamiento de los vehículos en la red de tráfico, tales como la posición, velocidad, aceleración incluso se puede modificar algunos parámetros utilizados en PARAMICS como la llegada de pasajeros a paradero entre otros, todo esto con el fin de modelar el comportamiento de los usuarios.

Didier (2009) en su trabajo de calibración y simulación del corredor de la Av. Pajaritos presenta algunas limitaciones del microsimulador PARAMICS y alcances de MISTRANSIT. Resalta cuatro limitaciones importantes respecto al tratamiento de la operación del transporte público para el caso chileno. En primer lugar, el nivel de demanda en paradero es propio en cada línea de buses, por lo cual cada pasajero generado por PARAMICS, inicialmente, espera solo un recorrido. Segundo, PARAMICS asume que la tasa de llegada de pasajeros de una línea determinada a cada paradero tiene tasa constante para todo el período de simulación y lo hacen distribuidos según un proceso de *Poisson*. Tercero, acepta solo un tipo de vehículo por línea cuando en la realidad cada línea puede tener más de un tipo de vehículo asociado. Finalmente, los tiempos de detención consideran puertas exclusivas para subidas y bajadas, lo que resulta inadecuado en el caso del corredor de la Av. Pajaritos.

MISTRANSIT ha sido mejorada en años recientes y en la actualidad el sistema de transporte público modelado es capaz de operar con estrategias de transporte, tales como: retención, salto de estación y ciclo corto. El código de MISTRANSIT está escrito en lenguaje de programación C++ y utiliza las funciones del módulo *Programmer* de PARAMICS.

MISTRANSIT tiene el potencial de incluir modelos de operación de sistemas de transporte público que utilicen tecnología ITS (*Intelligent Transportation Systems*) y vehículos controlados en tiempo real, donde los operadores tomen acciones de control en línea para optimizar el rendimiento del sistema en forma global.

En una versión extendida de MISTRANSIT, Romero (2008) mejora la operación de buses e implementa en un corredor (completo o en ciclo corto), la estrategia de retención de buses en paradero, con énfasis en los detalles de operación, como rebasamiento, también incorpora la evaluación de costos dentro del sistema. El autor propone una estrategia de retención de bus en paradero basada en la disponibilidad de tiempo con respecto al intervalo programado por tipo de bus.

En un trabajo posterior, Otárola *et al.* (2009) implementa mediante simulación la estrategia de control de prioridad de semáforos con retención y salto de estación sobre la operación del sistema de transporte público, para ello emplea el microsimulador PARAMICS con una nueva versión de MISTRANSIT que contiene el código de la estrategia de control sobre semáforos y la modelación adicional del transporte privado.

En aquellas circunstancias donde la resolución del problema de optimización resulta complejo es de gran utilidad la microsimulación como herramienta de validación de un diseño de estrategia de control. En este trabajo de investigación, se recurre a esta herramienta de modelación para validar el diseño del controlador predictivo híbrido así como el diseño del controlador experto simple. Para lo cual, se crea una nueva versión de MISTRANSIT que incluye la operación de las estrategias de retención, salto de estación e inyección de buses en ciclo corto en tiempo real sobre el sistema de transporte simulado.



### 3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

En este capítulo se describen dos elementos fundamentales para el desarrollo del diseño de la estrategia de control: el modelo de la operación del sistema de transporte público y las características operativas de las estrategias de retención en paradero, salto de estación e inyección de bus en ciclo corto.

En la modelación de la operación del sistema de transporte público se reconocen dos tipos de incidentes factibles, uno de mayor impacto que se caracteriza por perturbaciones mayores y que afectan gravemente a la programación planificada y otro de menor impacto con perturbaciones menores que no alteran la programación. El primer tipo de incidente está caracterizado por un incremento inesperado en la demanda de pasajeros en paradero, para el cual la estrategia de inyección de buses en ciclo corto resulta apropiada. Mientras que el segundo caso está representado por la congestión vehicular, para la cual la estrategia de retención de bus en paradero o la estrategia de salto de estación es una alternativa de solución. Las tres estrategias mencionadas se integran y son tratadas bajo un esquema de control predictivo en tiempo real. La ventaja de este enfoque integrado de estrategias sobre otros reportados en la literatura es la capacidad de gestión de flota a través de la inyección de buses para satisfacer el incremento de la demanda registrada en tiempo real.

La integración de estrategias busca optimizar la operación del sistema de transporte público mediante dos posibles combinaciones de estrategias. En la primera se considera las estrategias de retención y salto de estación como mecanismos de regularización de intervalos y consecuentemente de disminución de tiempos de espera, y en la segunda combinación se adiciona la estrategia de inyección de buses en ciclo corto con el fin de satisfacer el incremento de la demanda reportada en tiempo real, en adición a los objetivos específicos de las estrategias antes mencionadas. La función objetivo del diseño de la estrategia de control integrada busca beneficiar de manera conjunta a los operadores con menores costos asociados a la operación de buses y a los usuarios con menores tiempos de espera.

En la formulación del problema se consideran algunos criterios utilizados por Sáez *et al.* (2010), tales como la modelación de la demanda como una perturbación al sistema, la inclusión de un estimador de demanda y la modelación del sistema basada en la ocurrencia de un paso de muestreo variable y discreto a través de la generación de eventos, en terminal y en paradero. Esta diferenciación en tipo de generación de eventos se justifica porque en la estrategia de inyección de buses no es indispensable un análisis continuo de la demanda en el sistema, es así como los instantes de análisis de demanda por eventos generados en terminal pueden ser en menor número.

De esta manera, la modelación del sistema en un horizonte de predicción  $Np$  que involucra alta complejidad y tiempo de simulación inherente a la programación del modelo predictivo, se ven aliviados con la reducción del número de eventos generados.

Las estrategias de retención y salto de estación utilizan eventos en paradero que se activan cada vez que un bus llega a un paradero de control definido por el operador, mientras que la estrategia de inyección de buses en ciclo corto utiliza eventos en terminal que se generan cada vez que un bus, en operación normal o en ciclo corto, inicie su recorrido desde el terminal.

El sistema de transporte bajo la influencia de incidentes descritos anteriormente se caracteriza principalmente por la interacción entre la demanda (usuarios) y la oferta (flota de buses) que se describe a continuación.

### **3.1 Descripción del sistema de transporte público**

El sistema de transporte público modelado físicamente está constituido por una ruta específica de buses sobre la cual se moviliza una flota o conjunto de buses que cubren una zona determinada y satisfacen la demanda de viajes de los usuarios del sistema.

La ruta se define en la etapa de planificación estratégica y corresponde a aquella de menor costo entre las rutas factibles. Esta ruta de menor costo se caracteriza porque ningún usuario puede mejorar su tiempo de viaje o disminuir su costo con un cambio de ruta. Por tanto, la ruta establecida se mantiene fija en el corto plazo.

La ruta de buses o corredor se refiere al elemento lineal de alta demanda que está representado por un arco de una red primaria que conecta dos centros de tránsito y es alimentado por un servicio de buses locales. (Schneider & Smith, 1981). El corredor de buses modelado está segregado del transporte privado y en él se reconocen dos tipos de patrones o recorridos, uno en corredor completo y otro en ciclo corto, como muestra la Figura 3.1.

El primero tipo se extiende a lo largo de todo el corredor y es utilizado por la flota en operación normal  $F_a$  y el segundo cubre una zona más pequeña del corredor completo y es utilizado por la flota  $F_b$  que opera sólo cuando se inyecten buses al sistema para cubrir la zona de mayor demanda entre los paraderos límites del ciclo corto,  $S_0$  y  $S_1$ .

Los paraderos están equidistantes unos de otros a lo largo del corredor de buses; existen  $P$  paraderos que definen  $(P-1)$  tramos por sentido de tráfico. El efecto de las intersecciones semaforizadas está excluido de la modelación y por tanto tampoco se considera demoras ni detenciones.

En el corredor, el conjunto de buses en operación se moviliza formando un circuito simple. El bus genérico  $i$  parte vacío del terminal y se dirige al primer paradero, donde realiza su primera transferencia de pasajeros. Luego se desplaza con velocidad de recorrido  $\mathcal{S}$  por una pista exclusiva evitando la congestión hasta llegar a un paradero  $p$ , donde se realiza la transferencia de pasajeros y continúa su recorrido hasta alcanzar el terminal donde descienden todos los pasajeros.

Los buses son homogéneos y tienen restricción de capacidad, todos están controlados en tiempo real por el operador del sistema.

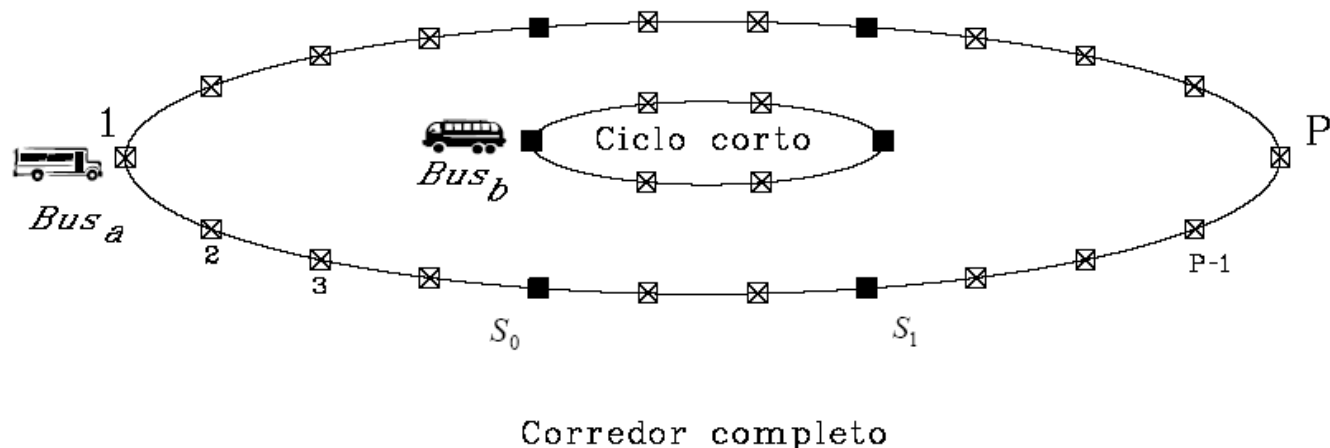


Figura 3.1. Corredor de buses con estrategias integradas

Un elemento fundamental del sistema de transporte es la demanda de pasajeros que define el tamaño de flota y el intervalo de diseño que debe proveer el operador del sistema. En la modelación se considera una demanda desagregada que afecta al sistema como una perturbación. La demanda es estimada basándose en información histórica (*off-line*) e información en tiempo real (*on-line*), Sáez *et al.* (2007).

La demanda está representada por los usuarios que arriban a la estación o paradero  $P$  a una tasa de llegada  $\lambda_p$ , que preferentemente se escoge tipo *Poisson*. La asignación de destinos de los usuarios que ingresan al sistema es estocástica y escogida entre las estaciones aguas abajo de la estación donde abordó. Por tanto, cada pasajero es caracterizado por su paradero de origen - destino y tiempo de arribo al paradero. No se considera el tiempo de acceso al paradero.

La demanda se estima con información esencialmente histórica que se representa en una matriz y está correspondiente al conjunto de paraderos al interior del corredor de buses, para un período de modelación (punta mañana, punta tarde, valle, u otros). Los registros históricos de llegada de usuarios a paradero corresponden a días e instantes anteriores al tiempo actual.

En cuanto se disponga de información en línea, ésta puede ser incorporada al estimador y ser usada como complemento a la matriz de demanda histórica para mejorar el estimador y predictor de la demanda.

En este trabajo se utiliza el estimador de demanda propuesto en el trabajo de Sáez *et al.* (2007), el cual predice el tiempo de arribo de cada usuario a paradero considerando la tendencia dada por los registros históricos y evaluados en ventanas de tiempo. Adicionalmente, se estima el destino más probable para cada uno de los usuarios.

La demanda de pasajeros en paradero es una variable fundamental en el diseño de la estrategia de control con inyección de buses porque un incremento de gran magnitud en la demanda obliga al operador del sistema a inyectar buses, cuya programación dependerá también de la programación actual de la flota y de la demanda observada en tiempo real.

### 3.2 Operación del sistema

En la operación del sistema de transporte público urbano se reconocen dos escenarios de operación de las flotas: una en condición normal que opera con la flota  $F_a$  y otra que incluye adicionalmente la operación de buses en ciclo corto  $F_b$ .

El sistema en operación normal está caracterizado por la presencia de la flota  $F_a$  que opera a lo largo del corredor completo con frecuencia variable  $f_a$ . Los operadores tratan que la frecuencia de operación se aproxime a la frecuencia de diseño  $f_a^*$ , la cual es definida en la etapa de planificación y satisface al volumen de pasajeros  $V_{\max}^0$  en el tramo más cargado del corredor de buses.

La frecuencia  $f_a^*$  es también la frecuencia de despacho de buses desde la estación de inicio del recorrido. En estricto rigor, cualquier variación en la demanda puede ser satisfecha por la flota  $F_a$  siempre y cuando el volumen en cualquier tramo dentro del corredor no exceda el volumen de diseño  $V_{\max}^0$ . Es por esta razón que la evaluación de la demanda en el sistema se vuelve imperiosa.

El sistema de transporte público con operación de buses en ciclo corto se caracteriza por la operación simultánea de las flotas  $F_a$  y  $F_b$ , con velocidades de recorrido,  $\mathcal{G}_i$  para todo bus  $i$ , donde  $i$  puede ser un bus de la flota  $F_a$  o  $F_b$ .

Cuando ambas flotas operan en el sistema se identifican dos patrones de recorrido: un patrón de recorrido completo y uno o más patrones posibles en ciclo corto.

El patrón de recorrido completo corresponde al viaje que realiza un bus de la flota  $F_a$  a lo largo del corredor y el patrón en ciclo corto que corresponde al viaje que realiza un bus de la flota  $F_b$  dentro del ciclo corto limitado por los paraderos  $S_0$  y  $S_1$ , como muestra la Figura 3.2.

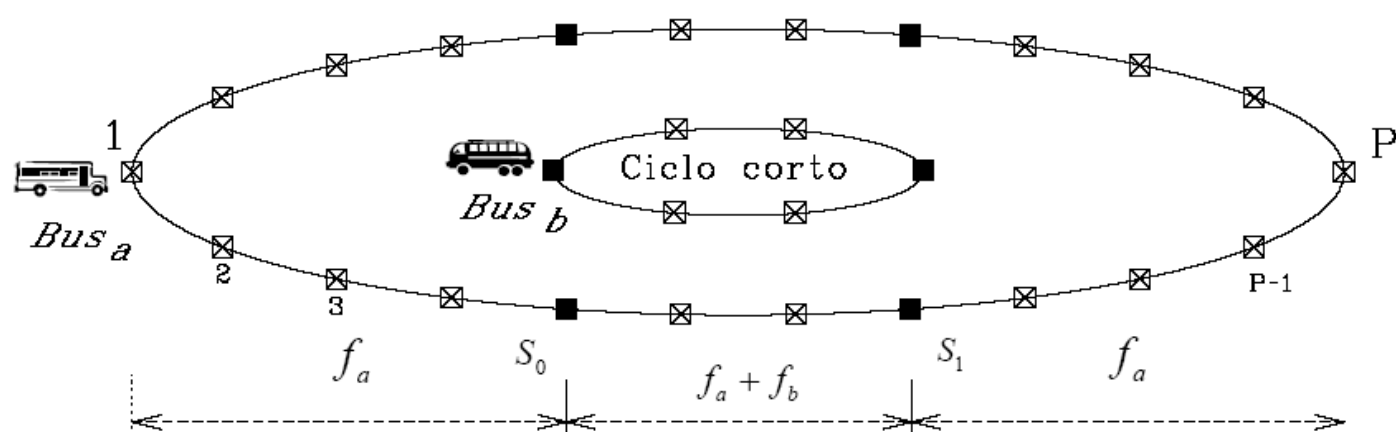


Figura 3. 2. Representación de un corredor de buses con estrategia bucles incluida

Inicialmente, la flota  $F_a$  opera tratando de ajustarse a su frecuencia de diseño  $f_a^*$  a través de alguna estrategia de control (retención, salto de estación, entre otras). La frecuencia es el recíproco del intervalo, en adelante los intervalos se relacionan como se muestra en la Figura 3.<sup>2</sup>

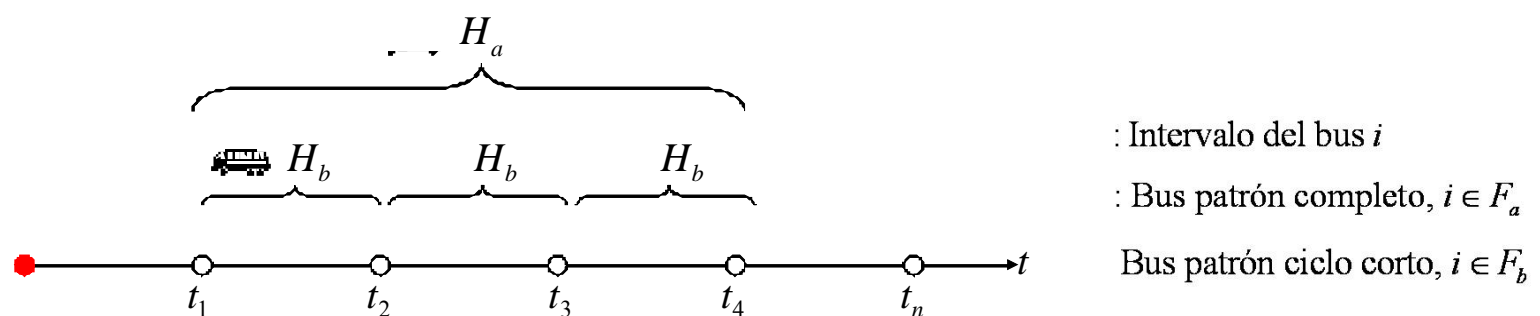


Figura 3. 3. Representación de la relación entre intervalos de buses tipo a y b

Una vez que se decide inyectar buses por un incremento excesivo en la demanda, la flota  $F_b$  es incorporada de tal manera que éstos operen en el intervalo de tiempo planificado para los buses de la flota  $F_a$ . Analíticamente queda expresado mediante la siguiente ecuación.

$$\text{Si } \hat{V}_{\max}(k') > \varphi \cdot V_{\max}^0 \text{ entonces } F_a(k') > F_a^* \quad (3.1)$$

Donde  $k'$  es evento en terminal que es generado cada vez que un bus en operación normal o en ciclo corto inicie su recorrido desde el terminal. Así, si el volumen máximo en el sistema,  $\hat{V}_{\max}(k')$  medido en un evento en terminal  $k'$  es mayor al volumen máximo de diseño  $V_{\max}^0$  afectado por un ponderador  $\varphi > 1$ , entonces la flota  $F_a$  requerida para satisfacer la demanda registrada en ese instante será mayor a la flota planificada  $F_a^*$ . Consecuentemente se deberá inyectar bus(es).

El patrón o patrones en ciclo corto son enteramente traslapados por un patrón completo y cubren el segmento de volumen máximo dentro del corredor.

Una característica importante a considerar en la operación de buses es lograr intervalos regulares ya sea de arribo o salida de buses desde el paradero, es por esto que se busca en el diseño de la estrategia *bucles* un régimen programado como el propuesto en Furth (1986) que utiliza la relación *scheduling mode*, para la operación de buses en ciclo corto de la flota  $F_b$  con frecuencia  $f_b^*$  que es un múltiplo  $r_p$  de la frecuencia  $f_a^*$  de los vehículos que sirven el corredor completo en operación normal.

Para el diseño de operación de buses en ciclo corto se consideran las siguientes variables:

(i) *Scheduling mode* (1:r), por cada bus en operación normal existen  $r$  buses que operan un patrón determinado.

- (ii) El intervalo de diseño  $H_i^*$  de la flota  $F_i$  con  $i \in \{a, b\}$ , donde  $a$  y  $b$  representan los buses de corredor completo y ciclo corto respectivamente.
- (iii) Los paraderos límites del ciclo corto,  $S_0$  y  $S_1$ .

En la modelación del sistema con estrategia *bucles* se asume que los buses que operan en ciclo corto son inyectados al sistema desde el terminal y tienen un tiempo de viaje adicional hasta llegar al primer paradero del ciclo corto.

Una variable de diseño importante es la capacidad de carga del bus  $\bar{L}$  que se asume igual para ambas flotas. Sin embargo, en futuros trabajos se puede considerar la capacidad,  $\bar{L}_a$  y  $\bar{L}_b$ , como variables de estado, donde cada flota tenga capacidad diferenciada. En algunas condiciones puede ser conveniente que la capacidad de los buses de ciclo corto sea menor que los buses del corredor completo.

El valor de la capacidad del bus  $\bar{L}$  es el resultado de aplicar un factor de diseño de carga al tamaño de vehículos  $Q$ . Este factor de diseño de carga considera la estocasticidad, tanto en el arribo de pasajeros como en los patrones de llegada de buses.

El factor de diseño de carga se establece suficientemente menor para prevenir sobrecargas durante la mayor parte del tiempo y se sugiere además que el factor de diseño de carga del bus de recorrido completo debería ser menor que el factor del bus de recorrido en ciclo corto, es decir otorgar una capacidad de holgura mayor a la flota  $F_a$  (Furth, 1986).

De forma genérica, para satisfacer la demanda de viajes origen-destino existente en el sistema de transporte público, la capacidad total provista en cualquier tramo  $p$  tiene que exceder el volumen máximo de pasajeros en ese tramo. Cabe mencionar que se utiliza la nomenclatura de paradero considerando que cada tramo tiene asociado un paradero de análisis. Entonces la expresión queda definida de la siguiente manera:

$$C(p) / H \geq q(p) \quad \forall p = 1, \dots, P \quad (3.2)$$

donde;

$q(p)$  es el carga de pasajeros por tramo  $p$  comprendida entre el paradero  $p$  y  $(p-1)$ .

$C(p)$  es la capacidad de carga agregada de pasajeros en el tramo  $p$ , en cada intervalo  $H_a$  de bus de recorrido completo  $a$ , y está representado por la ecuación 3.3

$$C(p) = r_p \cdot \bar{L} \quad (3.3)$$

Donde,  $\bar{L}$  es la capacidad de diseño única de buses (incluye tanto los tamaños de vehículos  $Q$  como el factor de diseño de carga) y  $r_p$  es el factor de la relación *scheduling mode*  $(1: r_p)$ ,

donde  $r_p$  representa el número de patrones en ciclo corto dentro de un recorrido en corredor completo.

Dada la capacidad del bus y los lugares de inicio y fin del ciclo corto. La ecuación 3.2 provee un límite superior al intervalo general  $H$ , dada por la expresión:

$$H \leq \min_p \frac{C(p)}{q(p)} \quad (3.4)$$

La ecuación 3.2 sirve como referencia para seleccionar los paraderos de inicio y fin del ciclo corto, considerando conocidas las variables *scheduling mode*,  $(1:r_p)$  y la capacidad de los buses,  $\bar{L}$ . El término derecho de la ecuación (3.2) corresponde al valor  $q^*$  que determina un límite superior para el intervalo  $H$ . Si el intervalo tiene que ser entero, entonces se redondea al minuto entero inferior. Luego dado  $H$ , la ecuación (3.2) provee límites superiores al volumen máximo de cada tramo.

Si la nueva configuración resultante de paraderos de inicio y fin de ciclo corto prueba que no es factible con el intervalo  $H$  de diseño, la localización de puntos de retorno ( $S_0$  y  $S_1$ ) pueden ser movidos hacia el extremo agrandando el tamaño del ciclo corto, si fuera el caso o el intervalo  $H$  puede ser reducido generando de esta manera una nueva ubicación de paraderos límites del ciclo corto.

Una vez que la flota mixta se encuentra en operación, los pasajeros cuyo viaje se localice al interior del ciclo corto tienen la opción de utilizar ya sea el bus de la flota  $F_a$  o de la flota  $F_b$ , tomarán aquel que primero arribe al paradero a menos que éste esté sobrecargado, condición que se pretende evitar en este trabajo mediante la coordinación en la programación de flotas y de restricción la capacidad en un bus en la modelación.

Para la formulación del problema se considera como parámetros exógenos: la capacidad del bus  $\bar{L}$ , porque se asume de capacidad fija dada por el operador y como parámetros endógenos las variables de decisión que se apliquen por tipo de estrategia de control, como se explica más adelante.

El sistema de transporte público opera regularmente sin control, es decir en lazo abierto. La operación sin control se caracteriza porque no existe acciones de control propuestas por un controlador que evalúa el proceso (operación del sistema) en busca de soluciones que constituye acciones de control sobre el sistema aplicables en tiempo real. El esquema de la Figura 3.4, muestra la interacción entre las variables de entrada, el proceso (sistema de transporte público) y las variables de salida.

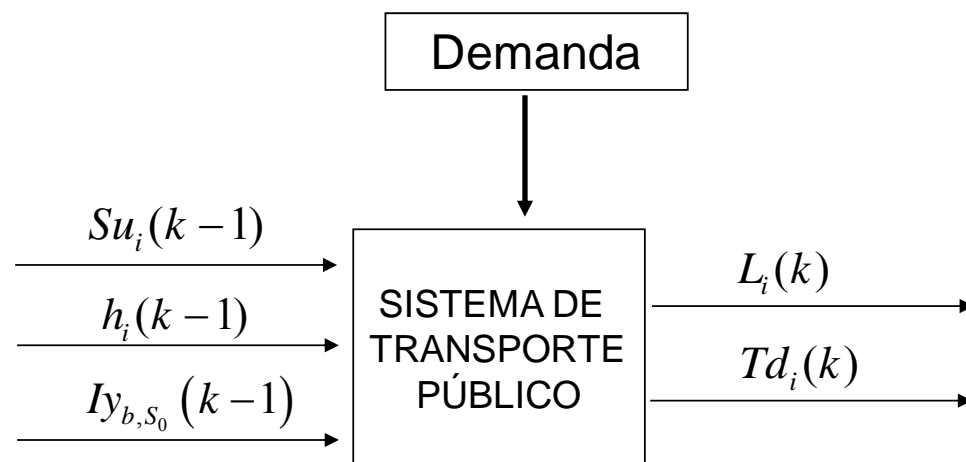


Figura 3.4. Esquema de operación del sistema de transporte público en lazo abierto

Donde,  $Su_i(k)$  es la acción de salto de estación,  $h_i(k)$  es la acción de retención de un bus en un paradero de control,  $Iy_{b,s_0}(k')$  es la acción de inyección de buses que ingresan al sistema en el paradero  $S_0$ ,  $L_i(k)$  es la carga de pasajeros registrada en el evento  $k$  y  $Td_i(k)$  es el tiempo de salida del bus desde el paradero.

La perturbación más representativa sobre el sistema de transporte es la demanda que causa frecuentemente irregularidad en los intervalos entre pasada de buses y en casos extremos causa aumento inesperado de demanda en paradero.

Cuando esto último ocurre, los operadores tienen la opción de aplicar estrategias de transporte sobre la operación del sistema, como inyección de buses, retención y salto de estación, estas acciones a la fecha no son retroalimentadas al sistema en busca de las mejores acciones sobre el sistema, sino que se aplican siguiendo tendencias observadas.

Para obtener el máximo provecho de las estrategias de transporte mencionadas se debería aplicar algún tipo de estrategias de control automático (control avanzado) sobre el sistema de transporte público. En general, el control avanzado se basa en un conocimiento más o menos acabado del sistema a controlar y utiliza un modelo matemático que lo describe en forma bastante aproximada, en todo su rango de operación y para cualquier instante de tiempo. Este modelo se usa tanto como parte integrante del sistema a controlar como para evaluar el desempeño del sistema a través de técnicas de simulación.

En los capítulos 4 y 5 se desarrolla el diseño de dos tipos de control avanzado, un experto simple y un predictivo híbrido, respectivamente. El controlador experto simple es más sencillo y utiliza una base de reglas para entregar acciones de control y éstas se aplican en tiempo real dada una evaluación *on-line* del sistema. Mientras que el controlador predictivo híbrido incorpora un modelo predictivo y una función objetivo para evaluar el comportamiento del sistema de transporte. El desempeño del controlador predictivo dependerá de la bondad de ajuste del modelo predictivo al proceso real.

Los dos tipos de controladores incluyen las estrategias de transporte tales como, la estrategia de retención, salto de estación e inyección de buses en ciclo corto como acciones de control y son comparados entre sí. El desarrollo de cada controlador se presenta en los siguientes capítulos.



## 4 CONTROL EXPERTO SIMPLE

El control experto se basa en la recopilación de conocimiento de un sistema, a partir de operadores del mismo que pueden considerarse como “expertos” en su área de conocimiento. Este conocimiento se transforma en una serie de reglas del tipo:

“Si  $x_1, x_2, \dots, x_n$  entonces  $y_1, y_2, \dots, y_n$ ”

Donde, “ $x_1, x_2, \dots, x_n$ ” representan los antecedentes o premisas e “ $y_1, y_2, \dots, y_n$ ” las consecuencias o acciones.

El control experto simple entrega acciones de control basado en un conjunto de reglas que cumplen un objetivo específico. Este control experto simple reconoce dos tipos de base de reglas.

La base de reglas del primer grupo busca mantener la equidistancia entre buses a través de un análisis local del sistema, específicamente en las cercanías de un paradero de control, cada vez que se genere un evento en paradero. En esta base de reglas, la variable de entrada es la distancia relativa  $d_i(k)$  del bus  $i$  cuando se genera el evento en paradero  $k$  y las acciones de control posibles son: retención, salto de estación o acción nula.

El segundo tipo de base de reglas cumple otro objetivo, el de satisfacer la demanda generada intempestivamente a través de un análisis global del sistema. La variable de entrada es el volumen de pasajeros por tramo  $V(k')$  evaluado en el evento en terminal  $k'$ ; la acción de control en tiempo real es la decisión de inyectar un bus en un tiempo de inyección definido en el diseño de operación de buses en ciclo corto. El análisis del controlador por tipo de base de regla asociado a un conjunto de estrategias se presenta a continuación.

### 4.1 Estrategia de retención y salto de estación

El controlador experto simple con estrategias de retención y salto de estación se activa cada vez que se genera un evento en paradero; esto es cuando un bus genérico  $i$  arriba a un paradero de control. En ese instante el sistema es evaluado de forma local y entrega al controlador experto una variable de entrada que en conjunto con una base de reglas define una de las tres acciones de control posibles: retención de bus en paradero, salto de estación o acción nula. La acción de control está directamente relacionada con la variable de entrada, en este caso con la distancia relativa  $d_i(k)$ . Así, si la distancia relativa pertenece a alguna de las reglas, entonces se aplica la acción de control propuesta en aquella regla.

La distancia relativa  $d_i(k)$  relaciona la posición del bus  $i$  que generó el evento  $k$  respecto a la distancia media esperada,  $D/2$ . La distancia  $D$  es calculada entre la posición del bus aguas abajo,  $(bus_{i+1})$  y la del bus aguas arriba,  $(bus_{i-1})$ . La Figura 4.1 muestra la relación entre las variables descritas.

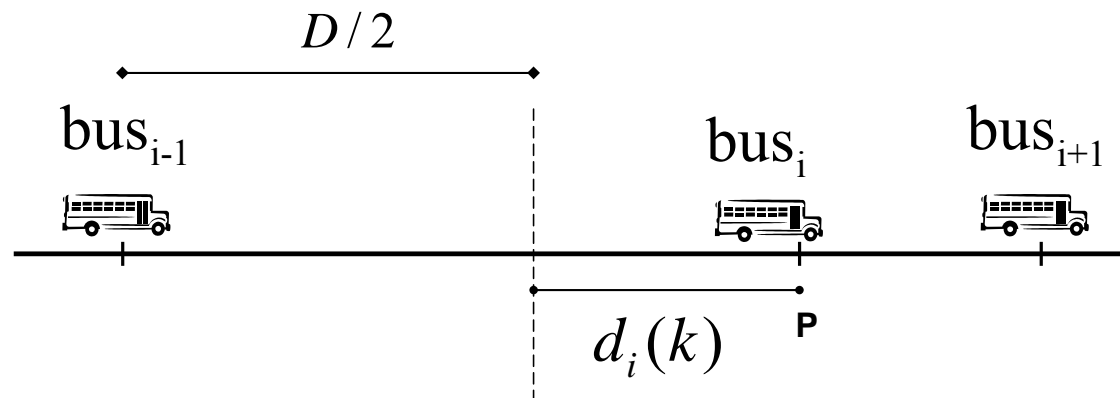


Figura 4.1. Distancia relativa del bus  $i$  respecto de los buses adyacentes,  $d_i(k)$

Cuando la distancia relativa  $d_i(k)$  es positiva, entonces el bus está adelantado y puede ser retenido en el paradero de control un intervalo de tiempo dado por la base de reglas. Caso contrario, si el valor de la distancia  $d_i(k)$  es negativo, el bus está atrasado y debe saltar la estación. La última alternativa de acción de control corresponde a la acción nula que se aplica cuando el bus  $i$  se encuentra en el intervalo medio de los buses adyacentes. Cabe mencionar que las acciones de control propuestas están sujetas a la factibilidad de la acción propuesta. Por ejemplo, si en un paradero de control existen pasajeros que tienen que descender y el control experto propone el salto de estación, entonces la acción de control se invalida, por cuanto se prioriza el descenso de los pasajeros.

### Base de reglas

La base de reglas se define considerando que el bus genérico  $i$  se desplaza en un tramo del corredor a una velocidad promedio de recorrido de 30 km/h, entonces:

En un tiempo de retención de  $x$  [seg], el bus  $i$  recorrería una distancia  $(30 \text{ km/h}) \cdot h_x(k)$

Donde,  $h_x(k)$  es el tiempo de retención de  $x$ [seg].

Si la acción de control es de salto de estación, entonces  $Su_i(k) = 1$

La variable de entrada del controlador experto es la distancia relativa  $d_i(k)$  que puede ser positiva, negativa o nula, definiendo en cada caso una acción de control  $u(k)$ . Las alternativas posibles son las siguientes:

1.- El bus  $i$  está atrasado.

$$\text{Si } d_i(k) < 0 \text{ , entonces } u(k) = Su_i(k)$$

2.- El bus  $i$  está adelantado o a tiempo

$$\text{Si } 0 < d_i(k) \text{ , entonces } u(k) = h_i(k)$$

3.- El bus  $i$  está a tiempo

$$\text{Si } 0 = d_i(k) \text{ , entonces } u(k) = 0$$

Donde;

$Su_i(k)$ : acción de salto de estación; 1 si salta el paradero y 0 en caso contrario

$h_i(k)$ : tiempo de retención del bus  $i$  en el paradero de control.

El tiempo de retención en paradero  $h_i(k)$  está determinado por la base de reglas. De forma general, el argumento de la regla se expresa de la siguiente manera.

$$\text{Si } L_j < d_i(k) \leq U_j, \text{ entonces } h_i(k) = h_j$$

Donde;

$L_j$ : distancia menor para aplicar una retención de  $h_j$  segundos

$U_j$ : distancia mayor para aplicar una retención de  $h_j$  segundos

Si la distancia  $d_i(k)$  del bus  $i$  se encuentra en el rango de  $L_j[m]$  como mínimo y  $U_j[m]$  como máximo, entonces, le corresponde la acción de retención  $h_i(k)$  en el paradero de control. Es decir,  $h_j[seg]$  de retención luego del proceso de transferencia de pasajeros.

De forma explícita, la base de reglas utilizada es la siguiente:

Si	$d_i(k) < 0$	, entonces	$u(k) = Su_i(k) = 1$
Si	$d_i(k) = 0$	, entonces	$u(k) = 0$
Si	$0 < d_i(k) \leq X$	, entonces	$u(k) = h_Y$
Si	$X < d_i(k) \leq 2X$	, entonces	$u(k) = h_{2Y}$
Si	$2X < d_i(k) \leq 4X$	, entonces	$u(k) = h_{4Y}$
Si	$4X < d_i(k) \leq 6X$	, entonces	$u(k) = h_{6Y}$
Si	$6X < d_i(k)$	, entonces	$u(k) = h_{6Y+\Delta}$

Donde,  $d_i(k)$  es la distancia medida en metros y la variable  $X$  utilizada corresponde a 250 [m]. El valor  $\Delta$  tiempo de retención de la última regla corresponde a un intervalo de tiempo pequeño, alrededor de un par de segundos.

El esquema del controlador experto con la base de reglas descritas para las estrategias de retención y salto de estación se presenta en la Figura 4.2.

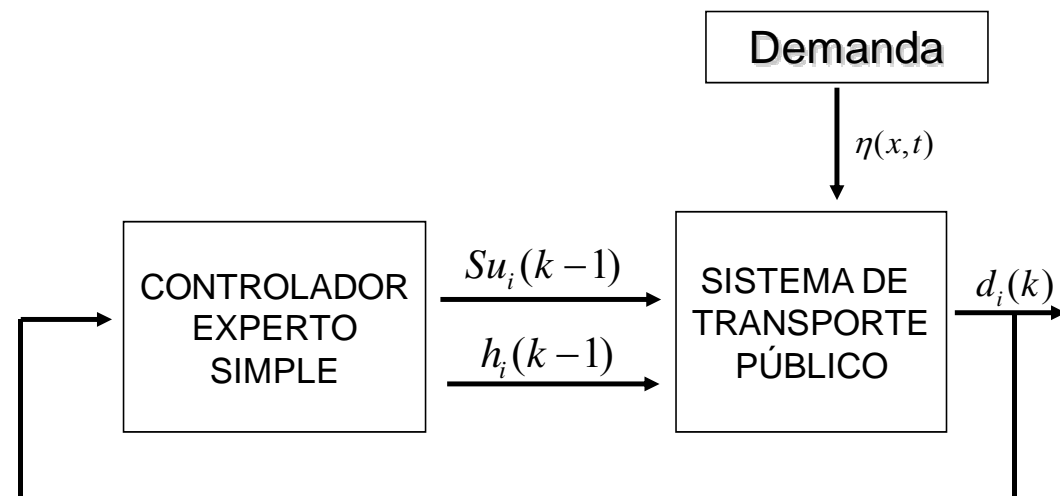


Figura 4.2. Control experto simple con estrategia de retención y salto

## 4.2 Estrategia de inyección de buses en ciclo corto

El sistema de transporte público opera en condición normal con la flota de buses  $F_a$ . Sin embargo, un aumento en la demanda no planificada en el diseño de operación obliga a inyectar buses de la flota  $F_b$  para satisfacer el incremento de demanda en una zona específica. La flota de buses inyectada opera en ciclo corto y de forma simultánea con la flota  $F_a$ , los buses operan de forma alternada procurando mantener los intervalos de diseño por tipo de flota. Esto se puede constatar en un paradero, cuando se observa viajes traslapados de ambas flotas que arriban al paradero en intervalos regulares. Los intervalos de operación por tipo de bus  $(a,b)$  se traducen a sus recíprocos, las frecuencias de operación  $f_a$  y  $f_b$ , respectivamente; donde el bus  $a \in F_a$  y el bus  $b \in F_b$ . La Figura 4.3. muestra la operación simultánea de las flotas mencionadas.

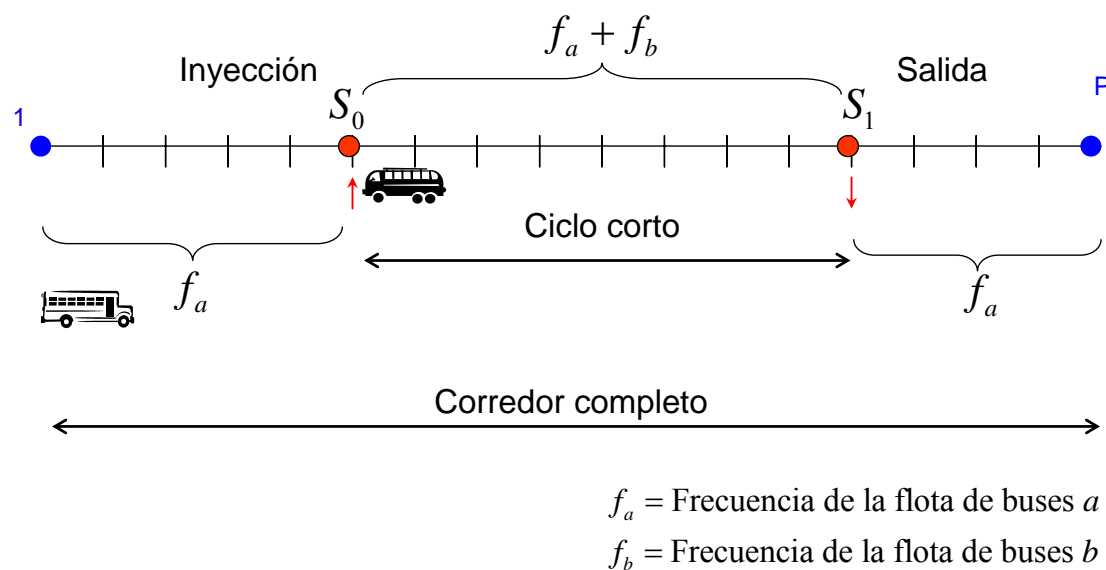


Figura 4.3. Operación simultánea de flotas con estrategia bucles implementada

El parámetro decisivo para la implementación de la estrategia de inyección de buses en ciclo corto es el volumen de usuarios por tramo, obtenido a partir de la demanda de pasajeros a lo largo del corredor de buses. La demanda  $n(x, k')$  es evaluada cada vez que se genere un evento en terminal  $k'$  que corresponde a la salida de un bus  $i$  desde el terminal.

El diagrama de bloques de la Figura 4.4 explica la interacción entre la variable de entrada  $\Delta V(k')$  que representa la variación incremental de la demanda medida cuando se genera un evento en terminal  $k'$  y la acción de control  $Iy_{b, S_0}(k')$  que corresponde a la acción de inyección del bus  $b$  en el paradero de inicio de ciclo corto  $S_0$ .

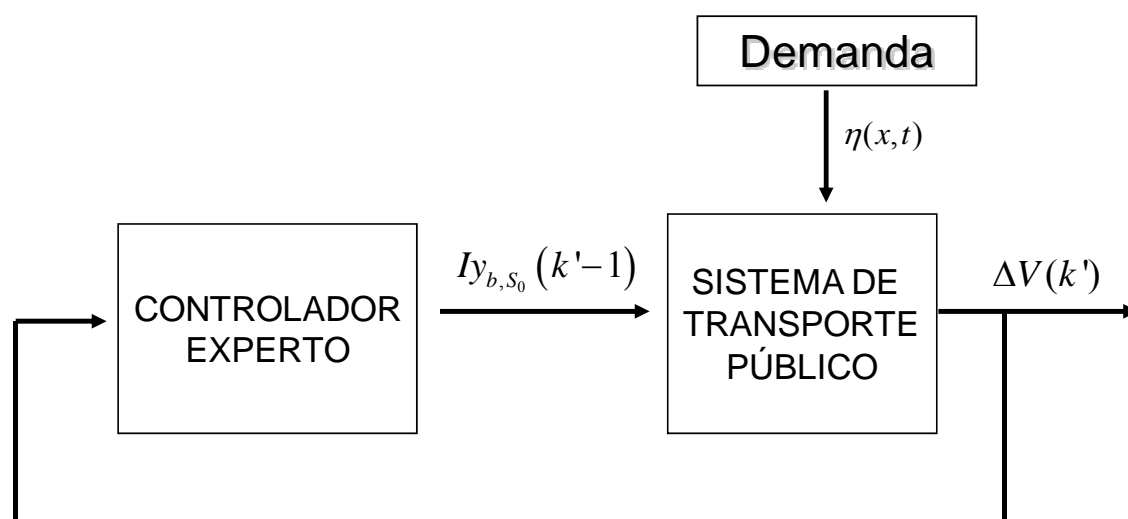


Figura 4.4. Control experto simple con estrategia de inyección de buses en ciclo corto

La demanda real  $\eta(x, t)$  en espacio  $x$  y tiempo continuo  $t$  es evaluada en el evento  $k'$  y traducida a volumen de usuarios por tramo. Este valor es comparado con su homólogo de diseño que se obtiene de la matriz de viajes (origen-destino). La matriz de viajes medida en pasajeros/hora corresponde a un período representativo: punta mañana, punta tarde o fuera de punta.

La demanda en tiempo real corresponde a la cantidad de pasajeros registrados en una ventana de tiempo no superior a una hora, esto con el fin de capturar el efecto de la demanda inesperada. El tamaño de la ventana escogido para el registro tanto de la demanda en tiempo real como la de diseño corresponde al intervalo de diseño  $H_i^*$  del bus  $i$ . El intervalo de diseño del bus  $a$ ,  $H_a^*$ , se define como el tiempo transcurrido entre salidas de buses  $a$  desde el terminal.

La demanda de diseño se traduce a una tasa de diseño ( $\lambda_d$ ) por cada paradero y la demanda real a una tasa real ( $\lambda_r$ ) también en cada paradero, esta última corresponde a la tasa de llegada de pasajeros que arriban a un tramo del corredor en los últimos  $H_a^*$  minutos a partir del instante en que se generó el evento  $k'$ . A través de esta comparación se establece la base de reglas para la inyección de un bus al sistema.

Si  $\lambda_r > 1.50 \lambda_d$ , entonces  $I_{y_{b,S_0}}(k') = 1$

Si  $\lambda_r \leq 1.50 \lambda_d$ , entonces  $I_{y_{b,S_0}}(k') = 0$

Como primera aproximación, se considera como representativo un incremento del 50% en la demanda actual registrada. Por lo tanto, si la tasa real  $\lambda_r$  es mayor en un 50% a la tasa de diseño  $\lambda_d$ , entonces se inyecta el bus  $i$  de la flota  $F_b$  al sistema. La decisión de inyectar un bus está representada por la variable binaria,  $I_{y_{b,S_0}}(k')$ . La magnitud del incremento en la demanda es un parámetro que puede ser calibrado en un trabajo futuro.

La etapa posterior es la programación de la operación de buses de la flota  $F_b$ , específicamente, la frecuencia de diseño  $f_b^*$ , tiempo de inyección  $T_{y_{b,S_0}}$  y los paraderos de inicio y fin del ciclo corto,  $S_0$  y  $S_1$ , respectivamente.

#### 4.2.1 Frecuencia de diseño

La frecuencia de diseño  $f_b^*$  de los buses que operan en ciclo corto se obtiene de la relación entre la tasa real ( $\lambda_r$ ) y la tasa de diseño ( $\lambda_d$ ). El valor entero de esta relación representa el valor  $r$  de la relación *scheduling mode* (1:r). De esta manera se acoge el criterio propuesto por Furth (1987) que sugiere que el valor  $r$  para la inyección de buses en ciclo corto debiera estar comprendido entre 1 y 4. De forma explícita, las relaciones posibles de *scheduling mode* serían: (1:1), (1:2), (1:3) y (1:4). Para clarificar el concepto de *scheduling mode*, se presenta un ejemplo que está representado en la Figura 4.5.

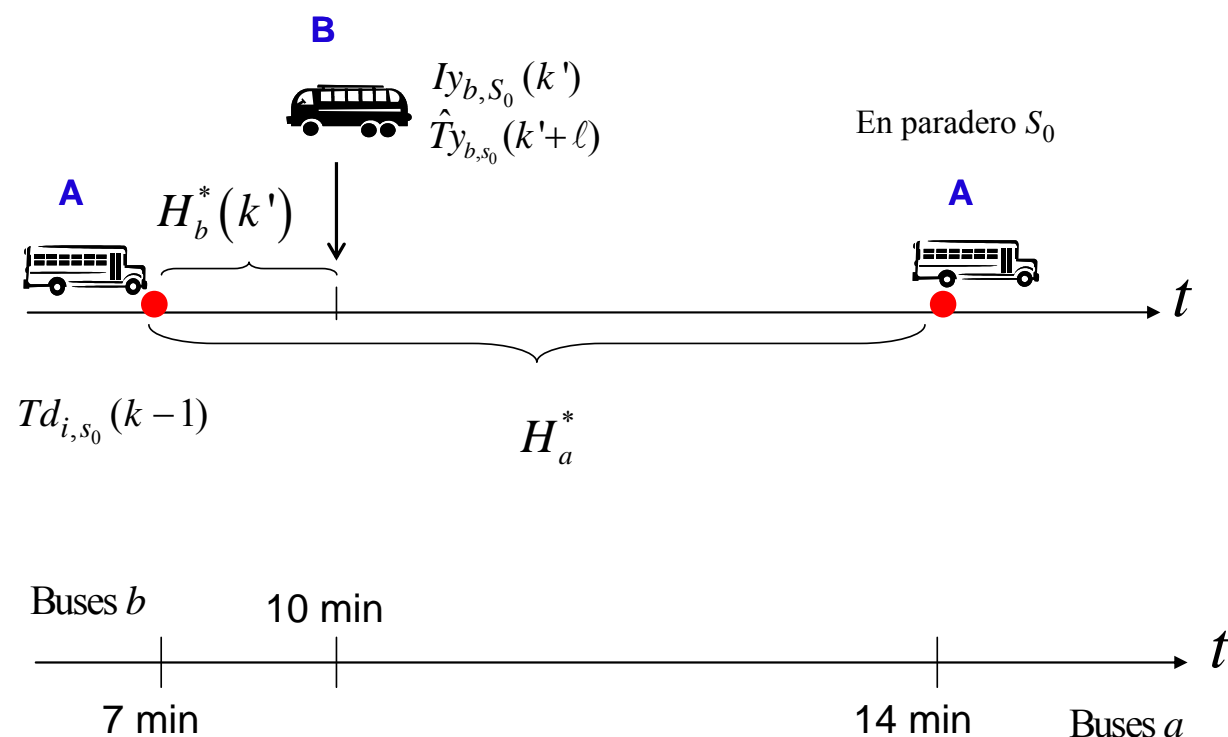


Figura 4.5. Inyección de buses en ciclo corto entre un intervalo  $H_a^*$

Considérese que la relación entre tasa real y tasa de diseño es de 1:2, donde el bus  $a$  de recorrido completo pasará por un paradero cada 7 minutos, mientras que los dos buses  $b$  de recorrido en ciclo corto pasarán por el mismo paradero en el minuto 10 y 13 respectivamente.

Cuando los buses operan simultáneamente, cada bus sirve a la demanda capturada en el intervalo entre pasada de buses. Así, los buses tipo  $a$  de recorrido completo toman 7 min. de la demanda total por tramo, si ésta está al exterior del ciclo corto y 1 min. de la demanda compartida por tramo si ésta está al interior del ciclo corto; mientras que los buses al interior del ciclo corto llevan 3 min. solo de la demanda compartida por tramo.

#### 4.2.2 Tiempo de inyección

El tiempo de inyección estimado  $\hat{T}_{y_{b,S_0}}(k'+\ell)$  en un evento futuro  $(k'+\ell)$  se determina con el intervalo de diseño  $H_b^*$  y el tiempo de despacho  $Td_{i,S_0}(k'+1)$  en el paradero de inicio del bucle  $S_0$ , mediante la expresión (4.1). Previamente la acción de inyección  $I_{y_{b,S_0}}(k')$  fue escogida cuando se generó el evento  $k'$ .

$$\hat{T}_{y_{b,S_0}}(k'+\ell) = \left( Td_{i,S_0}(k'+1) + H_b^*(k') \right) \cdot \frac{1}{I_{y_{b,S_0}}(k')} \quad (4.1)$$

El tiempo de inyección estimado  $\hat{T}_{y_{b,S_0}}(k'+\ell)$  debe ser efectuado en un rango factible que corresponde a la magnitud del siguiente intervalo  $H_a^*$ , como lo muestra la Figura 4.5. En caso que el tiempo de inyección esté fuera de este rango se inyectará en el siguiente intervalo  $H_a^*$ .

En cada paradero se produce un movimiento alternado de buses tipo  $a$  y  $b$  a lo largo del tiempo  $t$ . En el evento  $k'$  generado por un bus  $i$  se evalúa la decisión de inyección  $I_{y_{b,S_0}}(k')$  y el correspondiente intervalo de diseño  $H_b^*(k')$ . Cuando la decisión de inyección está tomada, se considera el tiempo de despacho  $Td_{i,S_0}(k-1)$  del último bus  $i$  en el paradero  $S_0$  y el intervalo de diseño  $H_b^*(k')$  y se comparan con el tiempo actual. Si el tiempo de inyección es mayor o igual al tiempo actual y además si el tiempo de inyección se encuentra en la ventana de tiempo del intervalo  $H_a^*$ , entonces se aplica la acción de inyección de un bus en ciclo corto. En caso contrario, la acción de inyección se descarta.

### 4.3 Control experto con estrategias de retención, salto e inyección de buses

Las estrategias de retención, salto de estación e inyección de buses en ciclo corto descritas anteriormente se integran en un controlador experto simple, como se muestra en la Figura 4.6.

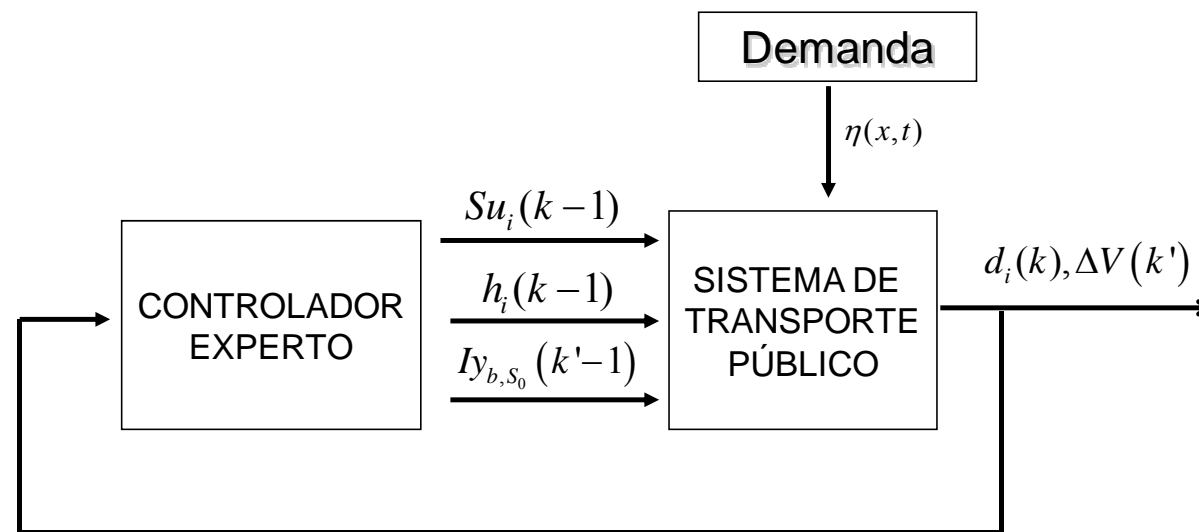


Figura 4.6. Esquema del controlador experto simple con estrategias integradas

Las estrategias de retención y salto de estación pueden trabajar de forma independiente de la estrategia de inyección de buses; es por ello que la base de reglas es diferente en cada caso. En el primer caso, las estrategias buscan regularizar el intervalo entre pasadas de buses por paradero, mientras que la estrategia de inyección busca recuperar el nivel de servicio a través de la inyección de buses para satisfacer el incremento en la demanda.

Las estrategias de retención y salto de estación son estrategias contrapuestas. Por lo tanto, si una de ellas se aplica la otra automáticamente se anula. La estrategia de inyección puede ser aplicada con cualquiera de las opciones cuando se genere un evento en terminal y el análisis del controlador indique que tales acciones de control son factibles.

### 4.4 Discusión

En este capítulo se entrega la descripción del controlador experto simple con estrategias de retención - salto de estación y estrategia de inyección de buses en ciclo corto que opera sobre el sistema de transporte público en tiempo real.

Si bien el controlador experto con estrategia de retención y salto de estación se focaliza en la zona donde se genera el evento, la ventaja se consigue por el considerable número de eventos generados que conllevan un análisis de la zona del evento generado, que puede llegar a abarcar gran parte del corredor.

El controlador experto es una alternativa de bajo costo computacional que entrega acciones de control razonables en tiempo real, con la limitación que el análisis del proceso miope, es decir no considera aspectos relevantes en la operación del sistema de transporte, como la perturbación que genera la magnitud de la demanda de usuarios en paradero, así como también la operación del sistema como un conjunto dependiente.



Con el propósito de mejorar el análisis de la situación real del sistema y predecir el comportamiento del sistema dadas las acciones del controlador experto simple, se plantea el uso de un controlador más sofisticado que analice la operación del sistema en conjunto y modele el comportamiento futuro con posibles acciones de control, y sobre este conjunto de alternativas se escoja aquella que cumpla una función objetivo definida por el operador del sistema.

En el siguiente capítulo se presenta la mayor contribución de esta tesis, el diseño de un controlador más sofisticado, que corresponde a un controlador predictivo híbrido que contempla las tres estrategias utilizadas en el controlador experto simple, específicamente la estrategia de retención, salto de estación e inyección de buses en ciclo corto.

## 5 DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE CONTROL PREDICTIVO HÍBRIDO CON INYECCIÓN DE BUSES

En este capítulo se presenta el diseño propuesto de estrategias de control dinámico bajo un esquema de planificación de flota. El diseño del controlador predictivo híbrido incluye las estrategias de inyección de buses en ciclo corto, la de retención de un bus en paradero y la de salto de estación como posibles acciones de control en tiempo real.

El controlador predictivo híbrido lleva el nombre de híbrido porque considera tanto variables discretas como continuas en su modelo de variables de estado. Este controlador se basa también en la generación de eventos para evaluar el sistema de transporte público y proponer acciones de control. Se utiliza la ocurrencia de un evento genérico  $K \in \{k, k'\}$ , en el cual se analiza el comportamiento del sistema en tiempo real y se entrega una acción de control que es aplicada en línea por el operador. El evento genérico  $K$  puede ser evento generado en paradero  $k$  o evento generado en terminal  $k'$ . El evento en paradero  $k$  se genera cada vez que un bus  $i$  arriba al paradero  $p$  y el evento en terminal  $k'$  se genera cada vez que un bus  $i$  sale desde el terminal de inicio del recorrido.

En este trabajo, la estrategia de inyección de buses en ciclo corto es desarrollada y validada mediante simulación, mientras que las estrategias de retención y salto de estación fueron propuestas por Sáez *et al.* (2010) y Cortés *et al.* (2009) y posteriormente se validaron mediante simulación en Otárola *et al.* (2008).

En la primera parte de este capítulo se desarrolla la estrategia de inyección de buses en ciclo corto formulada bajo un esquema de control predictivo, mientras que en la segunda parte se integran las tres estrategias de control en un controlador predictivo híbrido.

### 5.1 Estrategia de inyección de buses en ciclo corto

La estrategia de inyección de buses en ciclo corto involucra tres etapas: la primera cuando se detecta un incremento en la demanda en una zona específica, la segunda corresponde a la etapa de diferenciación en la demanda registrada en tiempo real y la tercera corresponde a la etapa de diseño de la estrategia de inyección de buses en ciclo corto.

#### 5.1.1 Detección de un aumento inesperado en la demanda

La información de la demanda que se utiliza para la estrategia de inyección de buses proviene de una matriz de demanda (origen-destino), donde tanto el origen como el destino corresponden a un paradero del corredor de buses. Cada vez que se genere un evento en terminal  $k'$  se evalúa la demanda  $\eta(x, k')$  en espacio  $x$  y tiempo discreto  $k'$ . Cuando la demanda se incrementa respecto de una demanda base (en operación normal), la flota  $F_a$  podría ser capaz de salvar perturbaciones que se generen en el sistema con alguna estrategia de control, como retención de

bus en paradero o salto de estación, siempre y cuando no exceda el volumen por tramo de diseño.

Si el incremento de la demanda sobrepasa este límite, entonces se detecta una falla en el sistema y se define un mecanismo de solución. Resulta necesario contar con un sistema sofisticado de detección de fallas para evaluar la variación en la demanda de pasajeros dentro del sistema de transporte público.

Dada la importancia de esto, como trabajo futuro se propone implementar un sistema de detección y aislamiento de fallas (*FDI, Fault Detection and Isolation*), Cortés *et al.* (2008), aplicado al sistema de transporte que alerte de forma inmediata un incremento excesivo y sostenido en la demanda y que incorpore la información obtenida en tiempo real al controlador propuesto. Esta herramienta de detección permitirá identificar de mejor manera una perturbación potencialmente dañina sobre la operación del sistema, como es el incremento no esperado en la demanda, tanto en la dimensión temporal como espacial, logrando con esta aplicación reducir costos al operador a través de la inyección del número de buses que satisfaga la función objetivo propuesta.

La demanda incrementada corresponde al arribo intempestivo de usuarios a un paradero producto de algún evento masivo que genere concentración de gran cantidad de usuarios en paradero y que sobrepase el valor estimado de diseño. Esta perturbación extrema, causará mayores tiempos de espera a los usuarios en paraderos y mayores tasas de ocupación de los buses, a menos que se implemente alguna estrategia para contrarrestar el cambio inesperado en los patrones de llegada. Para afrontar este problema, se utiliza un valor de demanda umbral; cuando éste es sobrepasado se justifica entonces la inyección de buses y esta alternativa es evaluada como posible acción de control.

El análisis de la demanda en tiempo real considera dos dimensiones: espacio y tiempo. La dimensión espacial, considera el área física a lo largo del corredor en el cual se emplazará el corredor en ciclo corto. Para ello, se busca la zona con mayor demanda donde se localiza los paraderos límites del ciclo corto,  $S_0$  y  $S_1$ .

La dimensión temporal es sin duda una variable de análisis relevante ya que permite definir si ésta aleatoriedad es de corta o larga duración. Si la condición de falla se mantiene en un intervalo de tiempo superior al definido, entonces se inyecta buses al sistema. Este análisis de incremento de demanda sostenido en el tiempo garantiza que la decisión de inyección sea a causa de una falla y no por una aleatoriedad breve.

Cuando las dimensiones espacial y temporal indican que el tamaño de flota existente es insuficiente, entonces se inyecta buses al sistema que operan exclusivamente en la zona de mayor demanda que corresponde al ciclo corto o bucle.

Para el diseño de la operación de la estrategia *bucles* o en ciclo corto, es necesario establecer el volumen de pasajeros en el tramo más cargado  $V_{\max}(k')$ , que se obtiene en cada instante de evaluación por evento en terminal  $k'$ . Esto podría extenderse a instantes de evaluación

continuos  $t$  en caso que se implemente un sistema de detección de fallas para evaluar la demanda de pasajeros en paradero en tiempo real.

El volumen de pasajeros en el tramo más cargado  $V_{\max}(k')$  corresponde al volumen máximo encontrado en algún tramo  $i$  a lo largo del corredor de buses.

Cada tramo de paradero de origen  $i$  y paradero de destino  $i+1$  tiene asociado un volumen  $V_i$  como muestra la Figura 5.1. El volumen de pasajeros está representado por la cantidad de usuarios acumulados por tramo. Los usuarios ingresan al sistema en cada paradero que está asociado a un tramo de análisis. El volumen por tramo es acumulativo y considera la cantidad de usuarios existentes en el tramo anterior y aquellos que suben y bajan en el tramo actual.

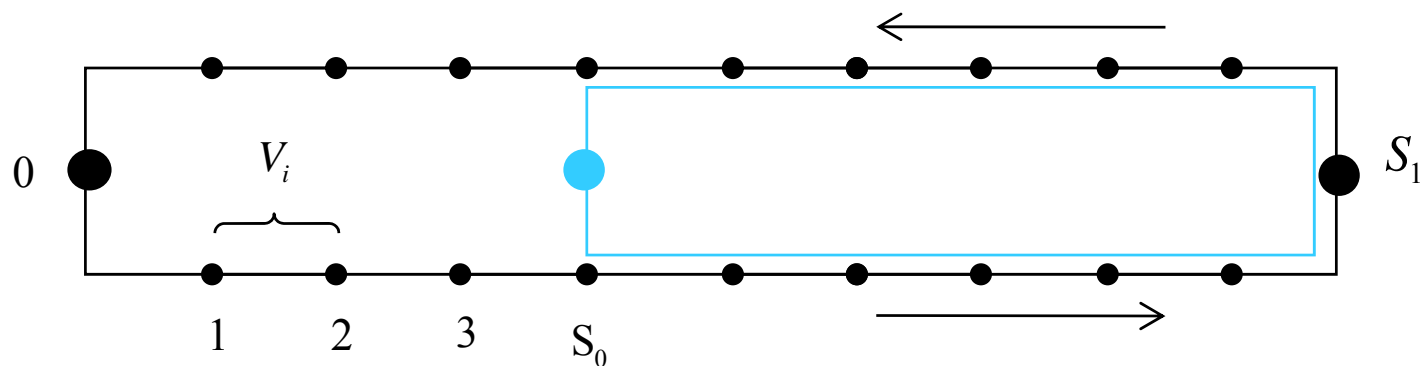


Figura 5.1. Representación del volumen por tramo  $i$  en un corredor de buses

De forma genérica, el volumen de pasajeros  $V_i$  entre los paraderos  $i$  e  $i+1$  para cada sentido de circulación está representado analíticamente por la siguiente expresión.

$$V_i(k') = V_{i-1}(k') + \lambda_i^+(k') - \lambda_i^-(k'); \quad i = 1, \dots, P-1 \quad (5.1)$$

Donde  $\lambda_i^+(k')$  es la tasa de subida y  $\lambda_i^-(k')$  es la tasa de bajada de pasajeros en el paradero  $i$  expresado en pasajeros por unidad de tiempo [pas/h].

El volumen por tramo se calcula en función de la demanda histórica, que proviene del estimador de demanda  $\hat{\eta}(x, t)$  y está dado por la siguiente expresión.

$$\hat{V}_{\max}(k') = \max \{ \hat{V}_i(k') \} \quad ; \quad i = 1, \dots, P-1 \quad (5.2)$$

Donde,  $\hat{V}_i(k')$  corresponde al volumen estimado por tramo de origen  $i$  y destino  $i+1$ , donde, tanto  $i$  como  $i+1$  corresponden a uno de los paraderos del corredor de buses.

Cuando el volumen  $\hat{V}_{\max}(k')$  es mayor al volumen de diseño  $V_{\max}^0$ , se define el Tiempo de detección de falla representado por la variable  $Tdf$ . Se propone entonces la inyección de un bus como una acción de control sobre el sistema mediante la variable de decisión  $Iy_{b, S_0}(k')$ . Posteriormente, se diseña la programación del bus a ser inyectado que operará en ciclo corto.

Cabe mencionar que el instante de detección de falla  $Tdf$  en adelante corresponde al tiempo de generación de evento en terminal  $k'$ .

Una vez establecido el volumen máximo de diseño en cada instante de evaluación, discreto  $k'$  o continuo  $t$ , se establece la comparación entre el volumen máximo actual y su homólogo pero de diseño. Si el volumen evaluado en tiempo real  $\hat{V}_{\max}(k')$  es mayor en un 50 % al volumen de diseño  $V_{\max}^0$  evaluado en una misma ventana de tiempo, entonces se establece una detección de un incremento considerable en la demanda que amerita aplicar estrategia de inyección.

Para implementar el modelo de la estrategia de control en el microsimulador PARAMICS se hizo algunas simplificaciones en la formulación original. El volumen en el tramo más cargado, que corresponde a la variable de entrada del controlador para la estrategia de inyección, se reemplazó por la demanda en paradero con la siguiente metodología aplicada.

La demanda corresponde a la cantidad de pasajeros existentes en un paradero, medidos en una ventana de tiempo fijo. La ventana o lapso de tiempo inicia en el momento en que se registra el evento  $k'$  y corresponde al intervalo de diseño  $H_a^*$  para buses tipo  $a$ . Esto se justifica porque el efecto del incremento en la demanda en tiempo real se cuantifica mejor en intervalos de medición más cortos. Como una extensión de este trabajo se propone sensibilizar sobre el tamaño de la ventana o asumir intervalos variables de medición para una demanda dada, ya sea por período del día o zona de análisis.

### 5.1.2 Partición de la demanda

La partición de la demanda se realiza para diferenciar a los usuarios que utilizan la flota que opera en el corredor completo,  $F_a$ , de aquellos que utilizan la flota que opera en el ciclo corto,  $F_b$ . La partición de la demanda cobra importancia cuando se realiza al interior del ciclo corto, donde los usuarios pueden escoger entre cualquiera de las dos flotas que operan. Las flotas  $F_a$  y  $F_b$  operan de forma simultánea al interior del bucle, con un tiempo de desfase entre buses. Este tiempo entre pasada de buses cuantificado desde un paradero se reconoce como el intervalo  $H_i$  del bus  $i$  dado un bus anterior. Se asume que la programación de la flota  $F_b$  que ingresa al sistema, está definida de tal manera que los intervalos  $H_b$  mantienen regularidad y el intervalo  $H_a$  tiene como límite un intervalo mínimo.

La Figura 5.2 y 5.3 muestran la partición de la demanda, específicamente a los usuarios que suben y bajan a cada tipo de flota, respectivamente. En la Figura 5.2. se representan a los usuarios que suben a cada tipo de bus. Los usuarios comprendidos en la zona externa al ciclo corto, definida entre los paraderos 1 a  $(S_0 - 1)$  toman exclusivamente los buses que operan el corredor completo, la flota  $F_a$ . Mientras que los usuarios que inician su viaje al interior del

ciclo corto en el paradero de inicio  $S_0$  y terminan en el paradero final  $S_1$  pueden tomar cualquiera de los buses de las flotas  $F_a$  o  $F_b$ .

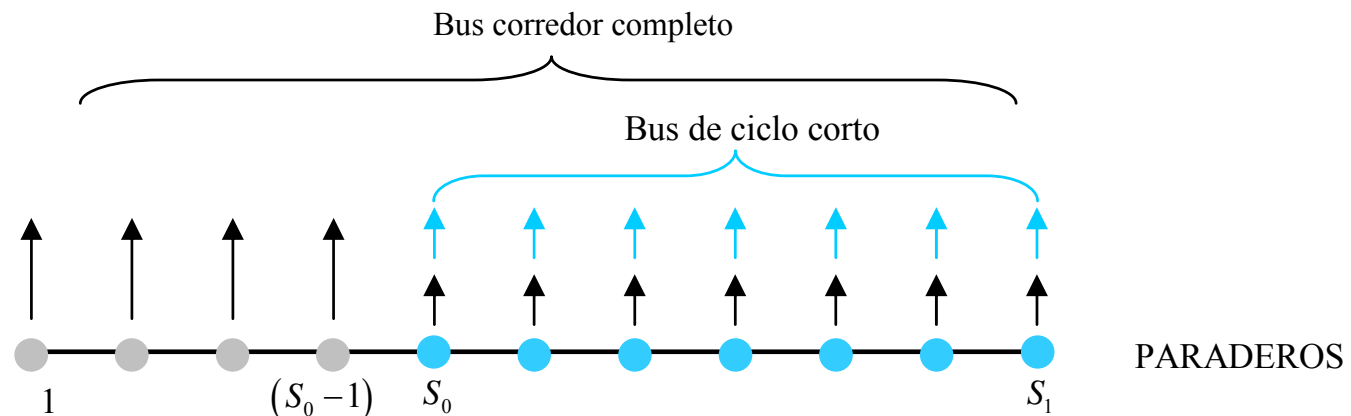


Figura 5.2. Distribución de usuarios que suben por tipo de bus

La Figura 5.3 muestra los usuarios que bajan por tipo de bus, ya sea que éste opere en el corredor completo o bien en el ciclo corto. Los usuarios que bajan en la zona externa del ciclo corto son aquellos que tomaron algún bus de la flota  $F_a$  en algún paradero aguas arriba. Mientras que al interior del ciclo corto los usuarios que bajan pueden ser de cualquiera de las dos flotas. Los usuarios que bajan de buses de la flota  $F_a$  pudieron subir en cualquier paradero aguas arriba, tramo representado por el trazado oscuro, mientras que los usuarios que bajan de un bus de la flota  $F_b$  pudieron subir en algún paradero aguas arriba al interior del ciclo corto, representado por el trazado claro en la Figura 5.3.

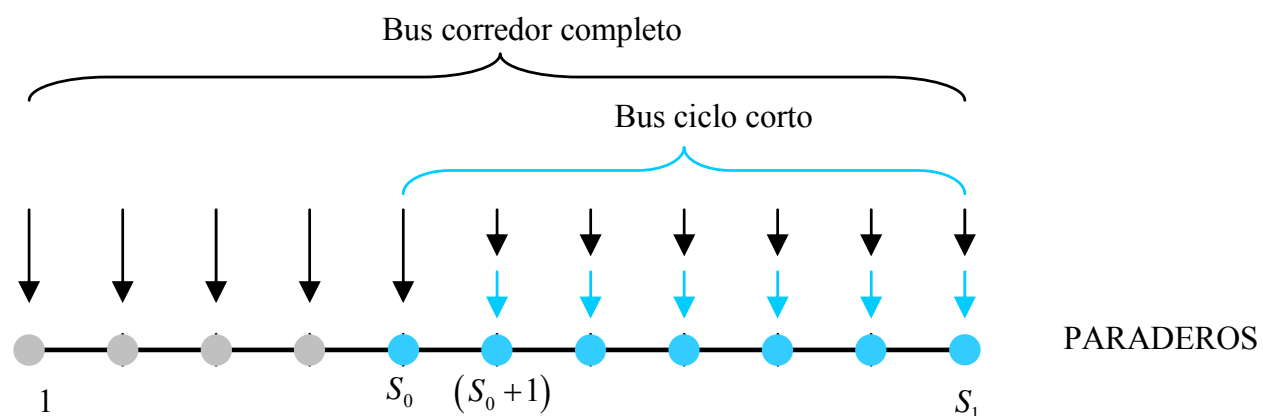


Figura 5.3. Distribución de usuarios que bajan por tipo de bus

### 5.1.3 Diseño de la estrategia de inyección de buses

El diseño comprende la determinación de las variables: frecuencia  $f_b^*$ , paraderos de inicio-fin del ciclo corto  $S_0 - S_1$  y tamaño de flota de buses a inyectar  $F_b^*$ . Las variables de diseño mencionadas se entregan al controlador para que estas reproduzcan la operación del sistema bajo el efecto de la posible inyección de un bus.

### 5.1.3.1 Paraderos de inicio y fin del ciclo corto

La localización de los paraderos límites de inicio  $S_0$  y fin  $S_1$  del ciclo corto dependen del perfil de carga que da cuenta del volumen por tramo a lo largo del corredor de buses.

La longitud del bucle o ciclo corto deberá ser lo suficientemente extensa como para cubrir el tramo más cargado  $\hat{V}_{\max}(k')$  y cubrir en su mayoría los destinos de los usuarios de ese tramo. Para llevar a cabo esto, se parte del supuesto que se dispone de información de la demanda en tiempo real, específicamente de información detallada que describe a cada usuario. En este caso hora de llegada al paradero y paradero de origen y destino. La Figura 5.4 muestra un ejemplo de perfil que concentra mucha demanda en una zona específica y la Figura 5.5 corresponde al tamaño del bucle para el ejemplo del perfil de demanda.

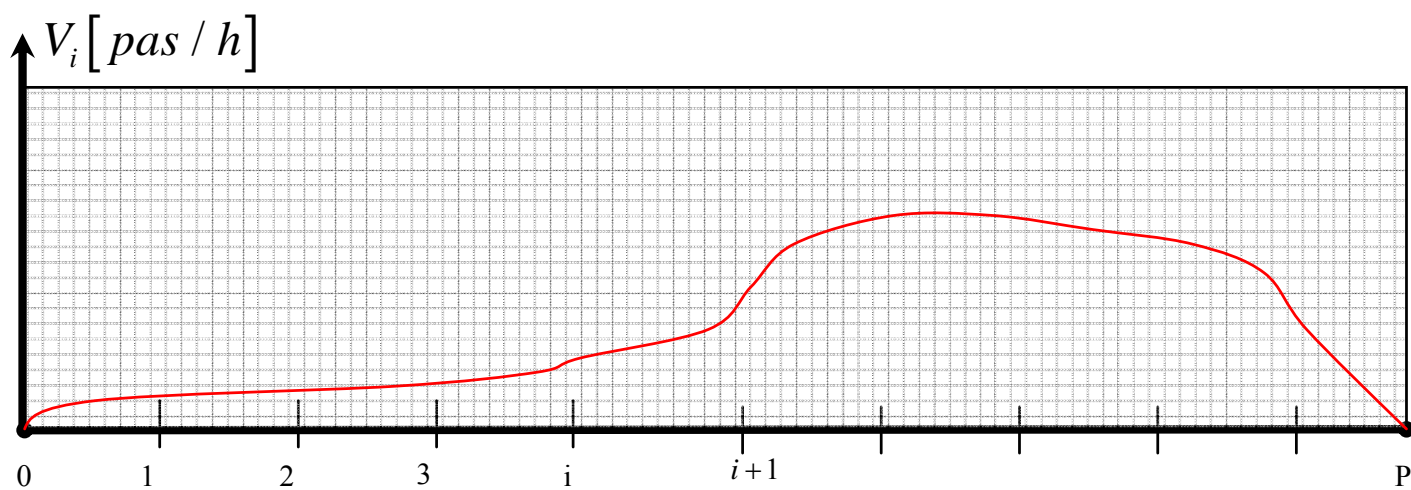


Figura 5.4. Perfil de demanda en un corredor de buses

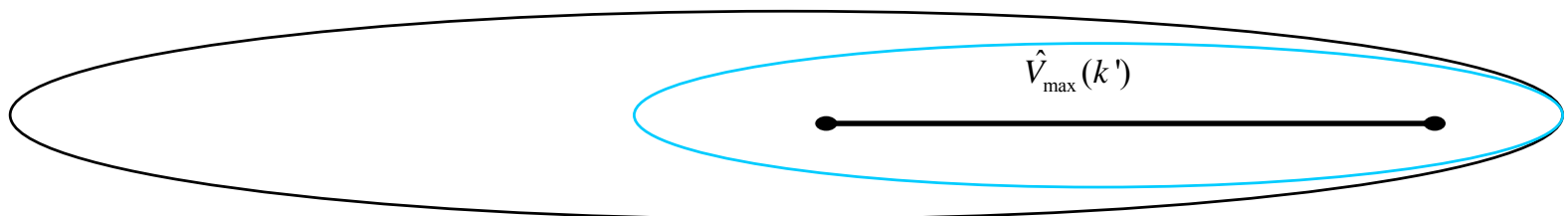


Figura 5.5. Tamaño del bucle para el perfil de demanda

Se propone dentro del esquema de control, que los paraderos de inicio  $S_0$  y fin  $S_1$  del ciclo corto sean variables manipuladas, por tanto, el tamaño del ciclo corto variará en cada horizonte de predicción y la función objetivo propuesta tenderá a que el tamaño del ciclo corto sea aquel que minimice también el costo de los operadores.

El ciclo corto deberá cubrir el tramo más cargado y los viajes origen-destino de los usuarios de aquel tramo. Se supone además que el paradero de inicio cuenta con un terminal donde se estacionan los buses de la flota  $F_b$ ; desde allí los buses serán inyectados al sistema de forma inmediata, mientras que el paradero de fin de ciclo dispone de espacio suficiente para realizar la maniobra de giro para el cambio de sentido como lo harían los buses de la flota  $F_a$ .

### 5.1.3.2 Frecuencia de diseño

La frecuencia de diseño,  $f_b^*$ , es la cantidad de buses de la flota  $F_b$  que operan en ciclo corto por unidad de tiempo. La frecuencia  $f_b^*$  está diseñada para satisfacer el aumento de la demanda que no puede ser cubierta por la flota  $F_a$ . El volumen de pasajeros, que cubre la flota  $F_b$ , corresponde a la variación entre el volumen máximo estimado,  $\max\{\hat{V}_i(k')\}$ , registrado en el evento en terminal  $k'$  y el volumen de diseño,  $V_i^0$ , de la flota  $F_a$ . Se considera en la expresión de la frecuencia (5.3) un factor de diseño ( $\varphi$ ) que recoge cualquier inexactitud o error. Este factor incorpora un delta adicional en el volumen de diseño de tal manera que ligero exceso del volumen de diseño puede ser absorbido por este margen de seguridad representado por el factor de diseño  $\varphi$ .

Las expresiones de frecuencia e intervalo, se presentan en las siguientes ecuaciones.

$$f_b^*(k') = \frac{\Delta V_{bucle}(k')}{L_{\max(b)}} \cdot \varphi \quad (5.3)$$

$$H_b^*(k') = \frac{1}{f_b^*(k')} \quad (5.4)$$

Donde;  $\Delta V_{bucle}(k')$  corresponde al máximo incremento en la demanda registrada en el evento  $k'$  y que será cubierta por la flota  $F_b$ . El volumen máximo corresponde al volumen de diseño para la operación de los buses en ciclo corto y este volumen por tramo debiera estar localizado al interior del ciclo corto definido entre las variables de decisión  $S_0$  y  $S_1$ .

Las variables  $S_0$  y  $S_1$  están definidas por su ubicación geográfica, específicamente por la distancia de cada una de ellas respecto de un punto de referencia, que en este caso se asume como el terminal de inicio de recorrido de la flota  $F_a$ .

La frecuencia de diseño  $f_b^*(k')$  se obtiene con la expresión del *scheduling mode* que relaciona las frecuencias de ambas flotas mediante un factor  $\eta$ , como muestra la expresión 5.5.

$$f_b^*(k) = \eta \cdot f_a^* \quad (5.5)$$

donde, el valor de  $\eta$  es un valor entero mayor a 1, Furth (1988).

En este trabajo el valor *scheduling mode* está acotado a  $\eta = \{1, 2, 3, 4\}$  por cuanto el intervalo de diseño  $H_a^*$  de la flota  $F_a$  no da cabida a intervalos  $H_b^*(k')$  grandes.

Entre estos valores posibles de  $\eta$  se considera aquel valor entero dado por la ecuación (5.6) y que representa el comportamiento de la demanda en el paradero más crítico.



$$\eta = \max \left( \frac{\hat{q}_i(k')}{q_i^0} \right) \quad (5.6)$$

donde,  $\hat{q}_i(k')$  está en [pas/h] y corresponde a la demanda en paradero que corresponde a la cantidad de usuarios que llegan al paradero  $i$  en el intervalo  $H_a^*$  una vez que el evento  $k'$  cuando algún bus es despachado desde el terminal. La variable  $q_i^0$  es la demanda promedio en el paradero  $i$  que se calcula como la cantidad de usuarios que llegan al paradero  $i$  en el mismo intervalo de análisis, utilizando la información de viajes de la matriz de demanda (O-D) que se emplea también para el diseño de operación de la flota.

### 5.1.3.3 Tamaño de flota

El tamaño de flota  $F_b^*(k')$  de bus tipo  $b$  que opera en el ciclo corto depende de la frecuencia de diseño  $f_b^*(k')$  y del tiempo de ciclo  $tc_b(k')$ . El tiempo de ciclo corresponde al tiempo que demora un bus en desplazarse a lo largo de su circuito. En este caso, el tiempo de ciclo corto es menor al tiempo de ciclo del corredor completo.

La expresión que relaciona estas variables es la siguiente:

$$F_b^*(k') = f_b^*(k') \cdot tc_b(k') \quad (5.7)$$

## 5.2 Control predictivo híbrido con estrategia integrada

El diseño de control predictivo híbrido con estrategia integrada de retención, salto de estación e inyección de buses en ciclo corto utiliza eventos mixtos, generados en paradero  $k$  y en terminal  $k'$ , dependiendo del tipo de estrategia que se active en el controlador. El evento en terminal  $k'$  es propio de la estrategia de inyección de buses que utiliza un paso más grande de evaluación sin afectar el modelo predictivo del controlador. En el caso de las estrategias de retención y salto de estación se mantiene la generación de eventos en paradero  $k$ .

El esquema de control predictivo híbrido para las estrategias de retención de un bus en paradero, salto de estación e inyección de buses en ciclo corto se presenta en la Figura 5.6.

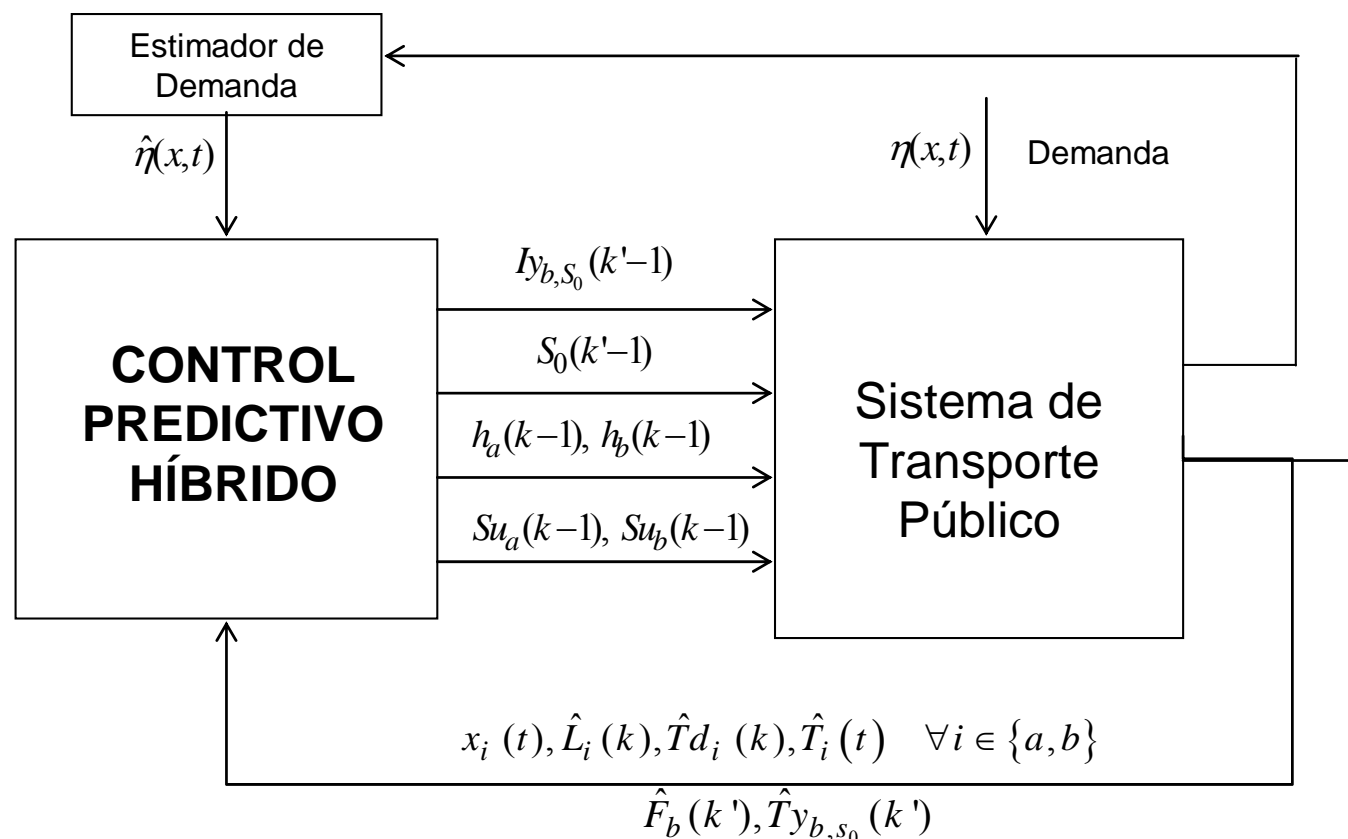


Figura 5.6. Esquema de control predictivo híbrido con estrategia de retención, salto e inyección de buses en ciclo corto

El diseño del control predictivo incluye como elementos las variables de entrada o acciones de control, variables de salida, variables de estado y función objetivo que se describen a continuación.

### 5.2.1 Modelo en variables de estado

El diseño de la estrategia de control utiliza un modelo que describe el comportamiento dinámico de las principales variables en función de las acciones de control. El modelo dinámico es actualizado con las variables de estado de posición, velocidad, tiempo faltante para el siguiente evento, carga de pasajeros, tiempo de salida del bus desde el paradero, tamaño de flota y tiempo de inyección.

En la operación del sistema, el bus genérico  $i$  puede ser del tipo  $a$  o  $b$ . Si el bus  $i = a$ , entonces pertenece a la flota  $F_a$  con  $a = \{1, 2, \dots, F_a\}$ . Si el bus  $i = b$ , entonces pertenece a la flota  $F_b$  con  $b = \{1, 2, \dots, F_b\}$ .

#### Posición

En general, cuando el bus genérico  $i$  ingresa al sistema desde el terminal, la variable posición  $\hat{x}_i(t)$  toma el valor cero y aumenta su magnitud conforme el bus avanza en su recorrido por su circuito, sea en corredor completo o en ciclo corto. El bus  $i = a$  opera en el corredor completo y el bus  $i = b$  opera en el ciclo corto. La posición del bus  $i$  en cualquier instante continuo  $t$  es una función de la velocidad estimada  $\hat{v}_i(t)$  y está dada por la siguiente expresión:

$$\hat{x}_i(t) = x_i(t_k) + \int_{t_k}^t \hat{v}_i(\mathcal{G}) d\mathcal{G} \quad (5.8)$$

donde  $t_k$  es el instante continuo donde el evento  $k$  es generado en paradero.

### Velocidad

La velocidad estimada  $\hat{v}_i(t)$  de forma genérica para cualquier bus  $i \in \{a, b\}$  es una función del tiempo continuo  $t$  y es modelada asumiendo una velocidad constante  $v_0$  cuando el bus  $i$  está en movimiento, en caso contrario es nula.

La velocidad  $\hat{v}_i(t)$  está dada por la siguiente expresión.

$$\hat{v}_i(t) = \begin{cases} 0 & t_k \leq t \leq t_k + h_i(k) + \hat{T}r_i(k) \\ v_0 & t_k + h_i(k) + \hat{T}r_i(k) \leq t \leq t_{k+d} \end{cases} \quad (5.9)$$

### Tiempo faltante para el siguiente evento

El tiempo  $\hat{T}_i(t)$  que le falta al bus  $i$  para que se genere el siguiente evento en el modelo dinámico depende del tipo de evento generado. Así, la estrategia de inyección se asocia a eventos en terminal  $k'$  mientras que las estrategias de retención/salto de estación se asocian a eventos en paradero  $k$ .

Cuando el sistema opera exclusivamente con las estrategias de retención y salto de estación, el siguiente evento de interés para el modelo predictivo corresponde al evento en paradero representado en la ecuación (5.10).

$$\hat{T}_i(t) = t_k + Su_i(k) \cdot (h_i(k) + \hat{T}r_i(k)) + Tv_i(k) - t \quad t_k \leq t \leq t_{k+d} \quad (5.10)$$

Donde; el tiempo que falta para el siguiente evento  $t_{k+d}$ , está asociado a los acontecimientos futuros que se producirán dado el tiempo actual del sistema  $t$ . Cuando el bus llega al paradero en el instante  $t_k$ , los acontecimientos futuros están asociados a un posible tiempo de retención  $h_i(k)$  y a un tiempo de transferencia  $\hat{T}r_i(k)$ , ambos potencialmente positivos en caso que la acción de control salto de estación  $Su_i(k)$  no se aplique. Además, la expresión (5.10) también depende naturalmente del tiempo de viaje  $Tv_i(k)$  entre paraderos contiguos.

El tiempo de transferencia estimado,  $\hat{T}r_i(k)$ , se calcula cuando un bus  $i$  llega a un paradero y genera el evento en paradero  $k$  mediante la siguiente expresión:

$$\hat{T}_i(k) = \text{Max}\{t_a \cdot \hat{A}_i(k), t_b \cdot \hat{B}_i(k)\} \quad (5.11)$$

Donde  $t_a$  y  $t_b$  denotan la tasa marginal de subida y bajada respectivamente, expresada en segundos por pasajero. Las variables  $\hat{A}_i(k)$  y  $\hat{B}_i(k)$  representan la cantidad estimada de pasajeros que descienden y abordan el bus  $i$  respectivamente cuando llega al paradero generando el evento  $k$ .

Cuando la estrategia de inyección está activa, el siguiente evento de interés es el evento en terminal  $k'$  que se genera cada vez que un bus es despachado del terminal donde inicia su recorrido. La expresión para el tiempo que falta para que se genere el siguiente evento en terminal  $\hat{T}_i'(t)$  para un bus genérico  $i$  esta dada por la siguiente ecuación.

$$\hat{T}_i'(t) = t_{k'} + H_i^* - t \quad t_{k'} \leq t \leq t_{k'+1} \quad \forall i \in \{a, b\} \quad (5.12)$$

El tiempo  $\hat{T}_i'(t)$  hace una distinción por tipo de bus porque el intervalo de diseño  $H_i^*$  es diferente por tipo de flota. Así, para cualquier bus  $a$  de la flota  $F_a$ , el intervalo de diseño es  $H_a^*$ , mientras que para el bus  $b$  de la Flota  $F_b$  el intervalo de diseño es  $H_b^*$ .

Es importante mencionar que el tiempo del siguiente evento en terminal  $t_{k'+1}$  corresponde al tiempo de la siguiente inyección de bus. Si el bus más próximo que se inyecta es el  $a$ , entonces tiene ya asignado su tiempo de ingreso al sistema mientras que si es un bus  $b$ , el tiempo de inyección está asociado al tiempo del último bus que ingresó al sistema y el intervalo de diseño  $H_b^*$ .

Cuando las estrategias de retención, salto de estación e inyección de buses en ciclo corto operan de forma simultánea, el tiempo faltante para el siguiente evento pertenecerá a aquel que se genere primero, calculado como el mínimo valor de las dos expresiones descritas anteriormente según ecuación (5.13).

$$\hat{T}_i(t) = \text{Min}\{\hat{T}_i(t), \hat{T}_i'(t)\} \quad \forall i \in \{a, b\} \quad (5.13)$$

### Carga de pasajeros

La carga estimada de pasajeros  $\hat{L}_i(k+1)$  en el proceso de transferencia, cuando se genera el evento  $k$ , está dada por la cantidad de pasajeros actual  $L_i(k)$  más aquellos que abordan  $\hat{B}_i(k)$  menos los que descienden  $\hat{A}_i(k)$ . La expresión queda afectada por una posible acción de control de salto de estación  $Su_i(k)$  que provoca que el bus no se detenga por transferencia de pasajeros. La expresión finalmente se representa en la ecuación (5.14).

$$\hat{L}_i(k+1) = \begin{cases} \min\{\bar{L}, L_i(k) + Su_i(k)(\hat{B}_i(k) - \hat{A}_i(k))\} & \text{Si el bus } i \text{ genera el evento } k \\ L_i(k) & \text{Caso contrario} \end{cases} \quad (5.14)$$

Donde,  $\bar{L}$  es la capacidad del bus genérico  $i$  y  $\hat{B}_i(k)$  es la cantidad de pasajeros que abordan el bus  $i$  sujeta a la restricción de capacidad del bus.

La cantidad de pasajeros que abordan un bus depende en gran medida del número de buses que operen en el sistema. Si la demanda es alta y opera la flota adicional  $F_b$ , entonces la alta demanda al interior del ciclo corto es compartida entre las flotas  $F_a$  y  $F_b$ , de esta manera la cantidad de usuarios que suban al bus será menor que en el caso que solo exista la flota  $F_a$  operando. La expresión (5.15) representa el caso de los usuarios que abordan un bus de la flota  $F_a$ .

$$\hat{B}_a(k) = \hat{H}_a(k) \cdot \lambda_p(t) \quad (5.15)$$

La cantidad de pasajeros  $\hat{B}_a(k)$  que abordan un bus  $a$  corresponde a los usuarios acumulados en el intervalo de tiempo  $\hat{H}_a(k)$  que llegan al paradero  $p$  a tasa  $\lambda_p(t)$ . El intervalo  $\hat{H}_a(k)$  es el tiempo transcurrido entre la llegada del bus  $i$  de la flota  $F_a$  a un paradero con respecto al bus anterior que pasó previamente por ese mismo paradero pudiendo ser este bus del tipo  $a$  o  $b$ .

En el segundo caso, la cantidad de pasajeros  $\hat{B}_i(k)$  que abordan un bus  $i$  está dada por la tasa de llegada de pasajeros,  $\lambda_p(t) \cdot \varepsilon$ , durante el intervalo estimado  $\hat{H}_i(k)$ . El factor  $\varepsilon$  representa la reducción de los pasajeros en paradero por la presencia de buses inyectados en el ciclo corto. La expresión de la cantidad de pasajeros que abordan un bus  $i$  está dada por la siguiente expresión.

$$\hat{B}_i(k) = \hat{H}_i(k) \cdot (\lambda_i(t) \cdot \varepsilon) \quad \forall i \in \{a, b\}; p \in \{S_0 - S_1\} \quad (5.16)$$

Donde  $\varepsilon$  es un valor en porcentaje que representa la cantidad de usuarios que tomarían el bus  $i$  dada una tasa  $\lambda_p(t)$ . El factor  $\varepsilon$  está sujeto a calibración, sin embargo se acoge un criterio conservador y se supone que en promedio la mitad de los usuarios en paradero abordan el bus en ciclo corto y la otra mitad toma el bus de corredor completo, con  $\varepsilon = 50\%$ . Este porcentaje  $\varepsilon$  depende de variables, tales como la ubicación del paradero al interior del bucle y de la tasa de ocupación del bus que llega; entonces este factor variará en cada paradero. Por ejemplo, si el paradero está localizado al inicio del ciclo corto es muy probable que muchos de los usuarios aborden el bus  $b$ , por cuanto éste empieza su recorrido y la tasa de ocupación será mínima; no así los paraderos ubicados al final del ciclo corto.

En la ecuación (5.14), la cantidad de pasajeros que descienden  $\hat{A}_i(k)$  y la cantidad de usuarios que abordan  $\hat{B}_i(k)$  el bus genérico  $i$  son estimadas en base a datos históricos obtenidos por ejemplo, de sensores instalados en paraderos o buses. Esta información en tiempo real constituye la variable de entrada del estimador de demanda que es activado en cada evento en paradero  $k$  para actualizar el tiempo de transferencia.

La cantidad de usuarios que descienden  $\hat{A}_i(k)$  en el evento  $(k)$  queda definida por los patrones de destino más probables obtenidos de datos históricos. Los usuarios que abordan  $\hat{B}_i(k)$  son calculados en base a la cantidad de usuarios en paradero  $\Gamma_p(k)$  y a la capacidad del bus  $\bar{L}$ .

La variable  $\hat{\Gamma}_p(k+1)$  representa la cantidad estimada de personas en paradero cuando el bus abandona el paradero que generó el evento  $k$  y está representada en la siguiente expresión.

$$\hat{\Gamma}_p(k+1) = \begin{cases} \Gamma_p(k) + \hat{\delta}_p(k) - \hat{B}_i(k) & \text{Si el bus } i \text{ genera el evento } k \\ \Gamma_p(k) + \hat{\delta}_p(k) & \text{Caso contrario} \end{cases} \quad (5.17)$$

Donde,  $\Gamma_p(k)$  es la cantidad de usuarios en paradero cuando el bus  $i$  llega al paradero en el evento  $k$  y  $\hat{\delta}_p(k)$  es la cantidad estimada de pasajeros que llegan al paradero en el intervalo comprendido entre el evento  $k$  y el instante en que el bus abandona el paradero.

Los usuarios  $\hat{\delta}_p(k)$  que llegan a paradero  $p$  en el evento  $k$  tienen características relevantes como la hora de arribo a paradero y destino más probable. Esta información se obtiene del estimador de demanda desarrollado por Sáez (2007) en su trabajo de memoria. La hora y destino más probable de cada usuario se obtiene de una predicción simplificada basada en ventanas móviles que son generados mediante un análisis estadístico usando modelos autorregresores con información de datos históricos. La hora de llegada de una persona a un paradero se realiza mediante promedios móviles mientras que el destino del usuario corresponde al destino más frecuente de la ventana generada.

### Tiempo de salida de un bus desde un paradero

El tiempo de salida de un bus está representado por la variable  $\hat{T}d_i(k+1)$  y está definida para todo bus  $i \in \{a, b\}$  ya sea que éste haya sido despachado desde el terminal o se encuentre en el sistema.

$$\hat{T}d_i(k+1) = \begin{cases} t_k + Su_i(k) \cdot (\hat{T}r_i(k) + h_i(k)) & \text{Si el bus } i \text{ genera el evento } k \\ Td_i(k) & \text{Caso contrario} \end{cases} \quad (5.18)$$

En la expresión (5.18), el término  $t_k$  está asociado al tiempo de llegada del bus  $i$  a un paradero, mientras que  $\hat{T}r_i(k)$  es el tiempo de transferencia de pasajeros en paradero para el bus  $i$ . El tiempo de transferencia y retención  $h_i(k)$  en el paradero de control está afectado por la acción de control de salto de estación  $Su_i(k)$ . El tiempo de retención se aplica cuando haya terminado la transferencia de pasajeros y durante este intervalo de tiempo no se permite el ascenso de pasajeros al bus.

Para la flota  $F_b$ , el tiempo de salida  $\hat{T}d_b(k+1)$  es dependiente de la existencia de un bus  $b$ , es decir del hecho que se haya inyectado ese bus  $b$  en su respectivo evento  $t_{k'} = Ty_b(k')$ . La ecuación de estado es la siguiente:

$$\hat{T}d_b(k+1) = \left( t_{k_b} + Tr_b(k) + h_b(k) \right) \cdot \frac{1}{Iy_b(k')} \quad (5.19)$$

El tiempo de salida de paradero esta definido sólo si existe el bus  $b$ ; en caso contrario el tiempo de salida es infinito; es decir:

$$\hat{T}d_b(k+1) = \begin{cases} t_b(k) + Tr_b(k) + h_b(k) & \text{Si } Iy_b(k') = 1 \\ \infty & \text{Si } Iy_b(k') = 0 \end{cases} \quad (5.20)$$

### **Buses inyectados en ciclo corto**

El número de buses inyectados al sistema  $F_b(k')$  es actualizado en cada evento  $k'$  con el fin de evaluar en el modelo predictivo la conveniencia en cuanto a costos de la implementación de la estrategia de inyección de buses en ciclo corto.

La cantidad estimada de buses tipo  $b$  en operación en el instante futuro  $(k+1)$  está dada por la siguiente expresión.

$$\hat{F}_b(k'+1) = F_b(k') + Iy_{b,S_0}(k') \quad (5.21)$$

Donde  $Iy_{b,S_0}(k')$  es la acción de control de inyección de buses. Si la variable es 1 entonces el bus  $b$  es inyectado al sistema en el paradero  $S_0$ ; en caso contrario la variable es 0 y el bus  $b$  no es inyectado.

### **Tiempo de inyección de un bus en ciclo corto**

El tiempo de inyección estimado  $\hat{T}y_{b,S_0}(k'+1)$  de un bus  $b$  en ciclo corto, con la variable de decisión  $Iy_{b,S_0}(k') = 1$ , está dado por la siguiente ecuación.

$$\hat{T}_{y_{b,S_0}}(k'+1) = \left( T_{v_{S_0}} + \hat{T}_{d_{i,S_0}}(k+1) + H_b^*(k') \right) \cdot \frac{1}{I_{y_{b,S_0}}(k')} \quad (5.22)$$

El tiempo de inyección  $\hat{T}_{y_{b,S_0}}(k'+1)$  depende del intervalo de diseño  $H_b^*(k')$ , del último tiempo de despacho  $\hat{T}_{d_{i,S_0}}(k+1)$  de cualquier bus  $i$  registrado en el paradero  $S_0$  y del tiempo de viaje  $T_{v_{S_0}}$  entre el terminal de ciclo corto y el paradero de inicio de ciclo corto,  $S_0$ . Cuando un bus  $i$  es despachado desde el terminal en un evento  $k'$ , se activa el controlador y entrega la acción de control  $I_{y_{b,S_0}}(k')$ , que es 1 si decide inyectar un bus  $b$  en el siguiente evento  $(k'+1)$  y 0 en caso contrario.

Adicionalmente, el tiempo de inyección de un bus  $b$  considera la interacción con la flota en operación  $F_a$ , esto con el fin de mantener un intervalo regular entre los buses  $b$ , así como también un intervalo adecuado entre buses de diferente flota. El objetivo de tener intervalos regulares entre buses de diferente flota es no sobrecargar los buses  $a$  que ya han recorrido parte de la ruta y que por lo tanto tienen tasa de ocupación muy superior a los buses  $b$  que empiezan el recorrido. En un paradero, el intervalo de un bus  $a$  respecto del bus anterior  $i$  deberá ser corto de manera que la cantidad de pasajeros acumulados sea mínima para no sobrecargar el bus  $a$ . El intervalo de diseño  $H_b^*(k')$  y el tiempo de inyección  $\hat{T}_{y_{b,S_0}}(k'+1)$  son parámetros de diseño de la estrategia de inyección y también variables de estado del controlador predictivo en cada instante de evaluación  $k'$ .

### **Intervalo de salida de buses del paradero**

El intervalo  $H_i(k)$  del bus  $i$  se mide en el paradero  $p$  que genera el evento  $k$  y está definido como la diferencia entre el tiempo de salida del bus  $i$  que generó el evento  $k$  en el paradero  $p$  y el tiempo de salida del bus anterior  $(i-1)$  en el mismo paradero  $p$  en un evento anterior  $(k - z_{i-1})$ , donde  $z_{i-1}$  representa el número de eventos que se generaron antes de que el bus  $(i-1)$  generara un evento en el paradero  $p$ . La expresión del intervalo de salida del bus  $i$ , se reduce a relacionar dos tiempos de despacho de buses consecutivos en el mismo paradero de análisis  $p$ , donde el bus  $i$  puede ser del tipo  $a$  o  $b$ .

La estrategia de inyección de buses tiene asociada la operación conjunta de ambas flotas, razón por la cual es conveniente desarrollar expresiones por separado por tipo de flota considerando en cada expresión la variable de inyección de buses en ciclo corto.

Para un bus  $a$ , el intervalo de salida  $\hat{H}_a(k+1)$  está asociado al tiempo de despacho del bus  $a$  que acaba de salir del paradero  $\hat{T}_{d_a}(k+1)$  y al tiempo de despacho  $\hat{T}_{d_{i-1}}(k+1 - z_{i-1})$  del bus



anterior  $(i-1)$ . Para el último término se asocia una variable binaria  $\beta$  que representa si el bus anterior corresponde a un bus de tipo  $a$  o  $b$ , donde;

$$\beta = \begin{cases} 1 & \text{Si el bus } (b-1) \text{ llegó al paradero en el evento anterior } (k+1-z_{b-1}) \\ 0 & \text{Si el bus } (a-1) \text{ llegó al paradero en el evento anterior } (k+1-z_{a-1}) \end{cases}$$

Finalmente, la expresión en el modelo predictivo que define el intervalo de salida  $\hat{H}_a(k+1)$  está dada por la siguiente expresión.

$$\hat{H}_a(k+1) = \hat{T}d_a(k+1) - \left[ \beta \cdot \hat{T}d_{b-1}(k+1-z_{b-1}) + (1-\beta) \cdot \hat{T}d_{a-1}(k+1-z_{a-1}) \right] \quad (5.23)$$

De forma análoga para un bus  $b$  inyectado en el sistema, la expresión del intervalo de salida  $\hat{H}_b(k+1)$  está compuesta por los siguientes términos.

$$\hat{H}_b(k+1) = \hat{T}d_b(k+1) - \left[ \beta \cdot \hat{T}d_{b-1}(k+1-z_{b-1}) + (1-\beta) \cdot \hat{T}d_{a-1}(k+1-z_{a-1}) \right] \quad (5.24)$$

En todos los casos, los intervalos de salida o entrada de buses a los paraderos tienen una restricción de intervalo mínimo  $H_{\min}$ .

### 5.2.2 Acciones de control

Las acciones de controlador son: la inyección de un bus  $b$ ,  $Iy_{b,S_0}(k')$ ; la retención de un bus  $i$  en paradero,  $h_i(k)$ ; la acción de salto de estación o paradero,  $Su_i(k)$  y el paradero límite de inicio del ciclo corto  $S_0(k')$ . La expresión (5.15) muestra las acciones desagregadas que se pueden aplicar.

$$u(K) = \left. \begin{cases} Iy_{b,S_0}(k') & \text{Se inyecta el bus } b \text{ en el paradero } S_0 \\ Su_a(k), Su_b(k) & \text{Salto de estación por tipo de bus, bus } i \in \{a,b\} \\ h_a(k), h_b(k) & \text{Retención en paradero por tipo de bus, bus } i \in \{a,b\} \\ S_0(k') & \text{Paradero de inicio del bucle en el evento } (k') \end{cases} \right\} (5.25)$$

donde,  $K \in \{k, k'\}$ .

#### Inyección de buses

La acción de control de inyección de buses  $Iy_{b,S_0}(k')$  es una variable de decisión binaria que toma el valor 1 si el bus  $b$  se inyecta en el sistema y 0 en caso contrario.

$$I_{y_{b,S_0}}(k') = \begin{cases} 1 & \hat{T}d_{i,S_0}(k) + H_b^*(k') \leq \hat{T}_{b,S_0}(t) \\ 0 & \text{Caso contrario} \end{cases} \quad (5.26)$$

donde  $t_k = \max\{t_{k,S_0}\}$  y  $t_k < t_{k'}$ . El tiempo del último evento generado,  $t_k$ , es el máximo tiempo registrado en el paradero  $S_0$  y el tiempo del evento  $k$  es menor al tiempo del evento en terminal  $k'$ .

La restricción para inyectar un bus en el evento  $k'$  está sujeta a que exista una ventana de tiempo para efectuar la inyección, es decir que el tiempo que falta para que se genere el siguiente evento  $\hat{T}_{b,S_0}'(t)$  en el paradero  $S_0$  sea mayor a la suma del tiempo último de despacho  $\hat{T}d_{i,S_0}(k)$  y al intervalo de diseño  $H_b^*(k')$ . En el diseño de la estrategia de control, los buses se inyectan uno a uno y esta decisión es evaluada en la función objetivo. En cada horizonte de predicción se propone una inyección de bus; así si el horizonte de predicción es de tres, entonces el modelo predictivo considerará 3 inyecciones consecutivas con sus respectivos intervalos  $H_b^*$ ; todas estas inyecciones parten de un mismo evento generado  $k'$ .

### Tiempo de retención en paradero

La acción de control de retención  $h_i(k)$  entrega el tiempo en segundos que el bus  $i$  es retenido en el paradero de control luego de la transferencia de pasajeros; durante este tiempo de retención no se permite el ascenso de pasajeros al bus. El tiempo de retención es un parámetro sujeto a calibración, sin embargo como primera aproximación se considera los siguientes valores discretos: 30, 60 y 90 [seg].

$$h_i(k) = \{30, 60, 90 \text{ seg}\} \quad \forall i \in \{a, b\} \quad (5.27)$$

### Salto de estación

La acción de salto de estación  $Su_i(k)$  se aplica en paraderos de control escogidos *a priori*. La acción de salto de estación es factible sólo en casos en que no existan usuarios que quieran descender en ese paradero, de ser así la acción de salto se anula.

La acción de salto de estación está dada por la variable de decisión  $Su_i(k)$  y toma los siguientes valores:

$$Su_i(k) = \begin{cases} 1 & \text{Si los pasajeros suben / bajan del bus } i \text{ en el evento } k \\ 0 & \text{Caso contrario} \end{cases} \quad \forall i \in \{a, b\} \quad (5.28)$$

### Paradero de inicio de ciclo corto

En la formulación se considera que el ciclo corto está emplazado en un extremo del corredor de buses, por tanto el límite de fin de ciclo corto  $S_1(k')$  es conocido y corresponde a uno de las terminales de los buses que operan el corredor completo. El paradero de inicio de ciclo corto  $S_0(k')$  es la variable manipulada y define la extensión del ciclo corto. Este paradero límite  $S_0(k')$  es una variable discreta y pertenece al subconjunto de paraderos cercanos a aquel con mayor volumen por tramo  $V_i(k')$ , donde  $i$  corresponde al paradero de mayor demanda y es éste paradero  $i$  uno de los candidatos potenciales para ser el paradero de inicio de ciclo corto,  $S_0(k')$ . La expresión que define el paradero de inicio de ciclo corto está dada por la siguiente expresión:

$$S_0(k') \in \{i, i+1, \dots, P\} \quad (5.29)$$

Donde  $i$  corresponde al paradero con mayor volumen por tramo registrado a lo largo del corredor de buses.

La localización del paradero  $S_0(k')$  debe tomar en cuenta adicionalmente la ubicación del terminal del cual serán despachados los buses en ciclo corto. Es decir, se deberá incluir algún criterio para escoger el paradero  $S_0(k')$ , como por ejemplo, el de minimizar el tiempo de viaje  $Tv_{S_0}(k')$  entre el paradero  $S_0$  y el terminal donde se produce la inyección.

### 5.2.3 Función objetivo

La componente principal del controlador predictivo híbrido es la función objetivo que determina acciones de control óptimas que en este caso minimicen el costo tanto de usuarios como de operadores en un horizonte de predicción  $Np$ . Cada horizonte de predicción está definido como el tiempo que transcurre entre el evento generado y el siguiente evento predicho. La función objetivo considera todos los buses  $i$  que operan en el sistema en el horizonte de predicción modelado. Las componentes de la función objetivo consideran los costos asociados a los usuarios y a los operadores; y son expresados en unidades monetarias. Para expresar el costo en unidades monetarias se aplica un factor de valoración del tiempo,  $c_i$ , que representa el costo asociado al término  $i$  de la función objetivo, así para el tiempo de espera el costo asociado está dado por el ponderador del tiempo ( $VST$ ) y para la flota inyectada el costo de operación está asociado a distancia recorrida o tiempo utilizado.

#### Costo de los usuarios

La función objetivo asociada a los usuarios busca minimizar el tiempo de espera en sus diversas modalidades dentro del sistema, esto incluye a todos los buses  $i \in \{a, b\}$  que generarán eventos  $(k + \ell - 1)$  en el período de evaluación.

$$\begin{aligned}
\min \sum_{\ell=1}^{Np} [ & \theta_1 \cdot c1 \cdot \hat{H}_a(k+\ell) \hat{\Gamma}_p(k+\ell) + \theta_2 \cdot c2 \cdot (\hat{H}_a(k+\ell) - H_a^*)^2 + \theta_3 \cdot c3 \cdot \hat{L}_a(k+\ell) h_a(k+\ell-1) \\
& + \theta_4 \cdot c4 \cdot \hat{\Gamma}_p(k+\ell) \hat{H}_{a+1}(k+\ell+z_{a+1}) (1 - Su_a(k+\ell-1)) + \theta_5 \cdot c5 \cdot \hat{H}_b(k+\ell) \hat{\Gamma}_p(k+\ell) \\
& + \theta_6 \cdot c6 \cdot (\hat{H}_b(k+\ell) - H_b^*)^2 + \theta_7 \cdot c7 \cdot \hat{L}_b(k+\ell) h_b(k+\ell-1) \\
& + \theta_8 \cdot c8 \cdot \hat{\Gamma}_p(k+\ell) \cdot \hat{H}_{b+1}(k+\ell+z_{b+1}) \cdot (1 - Su_b(k+\ell-1)) ]_{\substack{a=a(k+\ell-1); b=b(k+\ell-1) \\ p=p(k+\ell-1)}}
\end{aligned}$$

(5.30)

donde;  $a \in F_a$  y  $b \in F_b$ .

En la función objetivo se incorporan términos que están relacionados con el tiempo de espera de los usuarios en paradero, la regularidad en los intervalos de salida de buses, el tiempo de espera por acción de retención de buses y el tiempo de espera por la acción de salto de estación. Cada término está asociado a un evento  $(k+\ell)$  en el horizonte de predicción  $\ell$ , generado por un bus  $i \in \{a, b\}$ . Los términos de la función objetivo se describen de forma ordenada a continuación.

$\hat{H}_i(k+\ell) \hat{\Gamma}_p(k+\ell)$ : es el tiempo de espera total en paradero de los pasajeros asociados al evento del bus genérico  $i \in \{a, b\}$ .

$(\hat{H}_i(k+\ell) - H_i^*)^2$ : es un término regulatorio que intenta llevar  $\hat{H}_i(k+\ell)$  a su correspondiente valor referencial  $H_i^*$ ; éste último representa el intervalo de diseño del bus  $i \in \{a, b\}$ . Es decir, se busca minimizar la diferencia entre estas dos variables a través de mínimos cuadrados dentro de la función objetivo planteada.

$\hat{L}_i(k+\ell) h_i(k+\ell-1)$ : es la demora asociada a los pasajeros a bordo de un bus cuando son retenidos en un paradero de control por la aplicación de la estrategia de retención  $h_i(k+\ell-1)$ .

$\hat{\Gamma}_p(k+\ell) \cdot \hat{H}_{i+1}(k+\ell+z_{i+1}) \cdot (1 - Su_i(k+\ell-1))$ : es el tiempo estimado de espera adicional de los pasajeros de un paradero que fue saltado por un bus que aplicó la acción de salto de estación, es decir  $Su_i(k+\ell-1) = 0$ .

### Costo de los operadores

En general los operadores del sistema de transporte valoran más los gastos de mantenimiento de la flota y buscan minimizar sus costos. Cuando la estrategia de inyección está presente, los operadores tenderán a reducir sus costos a través de un menor número de buses  $b$  inyectados. La expresión asociada al costo de los operadores por concepto de inyección de buses es la siguiente.

$$\min \sum_{\ell=1}^{Np} \left[ \theta_9 \cdot c_9 \cdot I_{y_{b,s_0}}(k'+\ell) \right]_{b=b(k'+\ell-1)} \quad (5.31)$$

Donde;  $b \in F_b$ .

La variable binaria de inyección  $I_{y_{b,s_0}}(k'+\ell)$  es afectada por el ponderador de costo  $\theta_9$  que considera el costo de inyectar un bus al sistema,  $c_9$ .

Los ponderadores  $\theta$  de la función objetivo cuantifican el peso o importancia de cada término dentro de la función objetivo. Estos ponderadores son sintonizados de tal manera que la función objetivo alcance los menores valores esperados. En cada horizonte de predicción  $Np$  se evalúa la función objetivo sujeta a las siguientes acciones de control para todo bus genérico  $i$ , expresado en la siguiente ecuación.

$$u(K + \ell - 1) = \left\{ \begin{array}{l} S_0(k'+\ell-1) \\ I_{y_{b,s_0}}(k'+\ell-1) \\ Su_i(k+\ell-1) \\ h_i(k+\ell-1) \end{array} \right\}; K \in \{k', k\} \quad (5.32)$$

Donde,  $u(K + \ell - 1)$  representa una acción de control genérica  $K$  propuesta en el horizonte de predicción  $\ell$ . La acción de control genérica puede ser consecuencia de un evento generado en paradero  $k$  o por de uno terminal  $k'$ .

#### 5.2.4 Restricciones

El modelo dinámico propuesto tiene restricción física como la capacidad de buses y restricción operativa como en el caso de transbordos y adelantamientos.

La primera restricción considera que la tasa de ocupación del bus en todo momento no deberá exceder la capacidad disponible y aquellos usuarios en paradero que no pueden subir al primer bus deberán esperar al siguiente.

La segunda restricción excluye del diseño los transbordos entre las flotas  $F_a$  y  $F_b$ , por cuanto a los usuarios les interesa disminuir su tiempo de viaje y espera y un sistema con transbordos implica generalmente una demora extra por el proceso de intercambio de buses durante el viaje. Esta alternativa de operación sería conveniente si existiera una estrategia de coordinación de flotas que permita obtener beneficio adicional para los operadores sin perjuicio en el tiempo de espera de los usuarios.

Finalmente, la tercera restricción no considera adelantamientos durante la operación del sistema modelado. El sistema de transporte con estrategia fue diseñado de tal manera que siempre existirá precedencia de buses, el bus  $i$  estará delante del bus  $(i-1)$ , esto pese a que puedan existir ciertas condiciones de operación durante la simulación donde exista adelantamiento de

buses. En tal caso el modelo actualiza la condición de operación de todo el sistema cuando se genere un evento.

En resumen, en este capítulo se desarrolla el objetivo de este trabajo que corresponde al diseño de la estrategia de control predictivo híbrido con estrategias de retención, salto e inyección de buses en ciclo corto. El diseño propuesto se divide principalmente en dos etapas; el diseño de la estrategia de inyección de buses en ciclo corto y el diseño del control predictivo híbrido con las estrategias de retención, salto y inyección de buses en ciclo corto integradas.

La estrategia de inyección de buses en ciclo corto incluye inicialmente la detección de aumento en la demanda y la propuesta de inyección de un bus en ciclo corto que posteriormente se traduce en el diseño de operación de ese bus en ciclo corto. El diseño de operación del bus a ser inyectado permite modelar el comportamiento de ese bus en el sistema de transporte durante el horizonte de predicción.

Algunas variables de diseño de la estrategia de inyección de buses, tales como paradero de inicio y fin del ciclo corto y tiempo de inyección de un bus, se incluyen dentro del esquema del controlador predictivo híbrido. El controlador integra las estrategias de retención de bus en paradero, salto de estación e inyección de bus en ciclo corto como acciones de control factibles al sistema de transporte público. Estas estrategias de control se incluyen en una función objetivo que busca minimizar tanto el costo de operadores dado por el tamaño de flota en operación, así como el costo de los usuarios a través de menores tiempos de espera de los usuarios en paradero. El tiempo de espera a su vez tiene diferentes componentes asociadas al efecto de las acciones de control que se traducen en regularidad de los intervalos, ahorro de tiempo de espera por efecto del salto de estaciones y de la inyección de buses en ciclo corto.

El diseño del controlador predictivo híbrido incluye tres estrategias de transporte altamente eficaces para reducir el tiempo de espera de los usuarios en paradero, como son la retención de bus en paradero, salto de estación e inyección de bus en ciclo corto. El diseño de la estrategia de control dinámico opera en el sistema de transporte público con una característica de demanda particular, que corresponde a un incremento inesperado de la demanda.

## 6 VALIDACIÓN DEL DISEÑO MEDIANTE SIMULACIÓN

El diseño propuesto para la estrategia de control predictivo híbrido con retención, salto de estación e inyección de buses en ciclo corto es puesto a prueba y validado mediante simulación. Este mecanismo es una buena aproximación del caso real, por cuanto el simulador utiliza una plataforma de modelación adicional al que proporciona el microsimulador de tráfico PARAMICS. Este software comercial, simula la operación del sistema de transporte público en una red de tráfico definida por el operador y sujeto a una perturbación que corresponde a la demanda de usuarios que arriban desde el paradero.

Para programar el diseño de la estrategia de control en el microsimulador PARAMICS, se parte de la última versión de MISTRANSIT (MICROscopic Simulation TRANSIT) y se crea una nueva, llamada MISTRANSIT CON ESTRATEGIAS. En sus orígenes, esta plataforma fue creada para representar de mejor manera la interacción entre los actores del sistema de transporte mediante el uso de la herramienta “*Application Programming Interface (API)*”, propia del microsimulador. Cortés *et al.* (2010) y Fernández *et al.* (2010)

Tomando como base la última versión de MISTRANSIT, se programó las estrategias de control (retención, salto de estación e inyección de buses) y los controladores Experto Simple (CES) y Predictivo Híbrido (HPC).

A la validación del diseño propuesto por este trabajo, se incorpora la validación del diseño de un controlador experto simple con estrategias de salto de estación y retención de buses en paradero, propuesto en Pillajo *et al.* (2007) y en Sáez *et al.* (2010), que se complementa como parte de este trabajo con la estrategia de inyección de buses. El objetivo de esta validación adicional es comparar los resultados obtenidos del controlador predictivo híbrido con un controlador experto simple, cuando estos operan con el mismo grupo de estrategias. Las estrategias de retención-salto de estación e inyección de buses en ciclo corto son programadas de tal manera que pueden operar solas o combinadas.

La programación del diseño de la estrategia de control predictivo híbrido y del controlador experto se realiza en lenguaje de programación C++ y C, respectivamente. Los lenguajes de programación se escogieron por el grado de complejidad en la programación de cada uno de los controladores, el predictivo es más complejo porque incluye un modelo predictivo del comportamiento del sistema. El microsimulador PARAMICS cuenta con funciones específicas en su módulo, *programmer*, que permite manipular algunas variables del sistema de transporte público, como por ejemplo la velocidad, tiempo de detención en paraderos, entre otros. A continuación se explica la modelación de una red en PARAMICS y posteriormente se detalla la interacción de cada uno de los controladores con la red modelada.

### 6.1 Modelación de la red en PARAMICS

Se modela en PARAMICS un corredor de buses incluyendo a todos los agentes involucrados en la operación de un sistema de transporte público, tales como flota de buses, demanda de pasajeros e infraestructura como semáforos y paraderos. La interacción entre estos actores

genera variables de servicio cuantificables, como tiempos de espera, viaje y demoras que permiten dar cuenta de la eficiencia de la operación del sistema.

La red de transporte se crea en el módulo “Modeller” de PARAMICS y posteriormente se calibra antes de ser utilizada en el microsimulador con las estrategias de control.

Para ejecutar una simulación son necesarios: la red de transporte calibrada y un archivo adjunto (\*.dll) obtenido de la compilación del código en el software Microsoft Visual Studio 2005. Este archivo compilado es el vínculo entre PARAMICS y MISTRANSIT CON ESTRATEGIAS, así en la simulación sobre la red operarán tanto las funciones específicas de PARAMICS como las funciones adicionales de MISTRANSIT CON ESTRATEGIAS, como por ejemplo la operación de un controlador con estrategias de transporte.

El microsimulador PARAMICS tiene asociado funciones básicas para la operación de buses, mientras que MISTRANSIT CON ESTRATEGIAS opera de forma complementaria e incluye la implementación de un controlador en el sistema de transporte público. La Figura 6.1. muestra un diagrama explicativo de la interacción entre PARAMICS y MISTRANSIT CON ESTRATEGIAS.

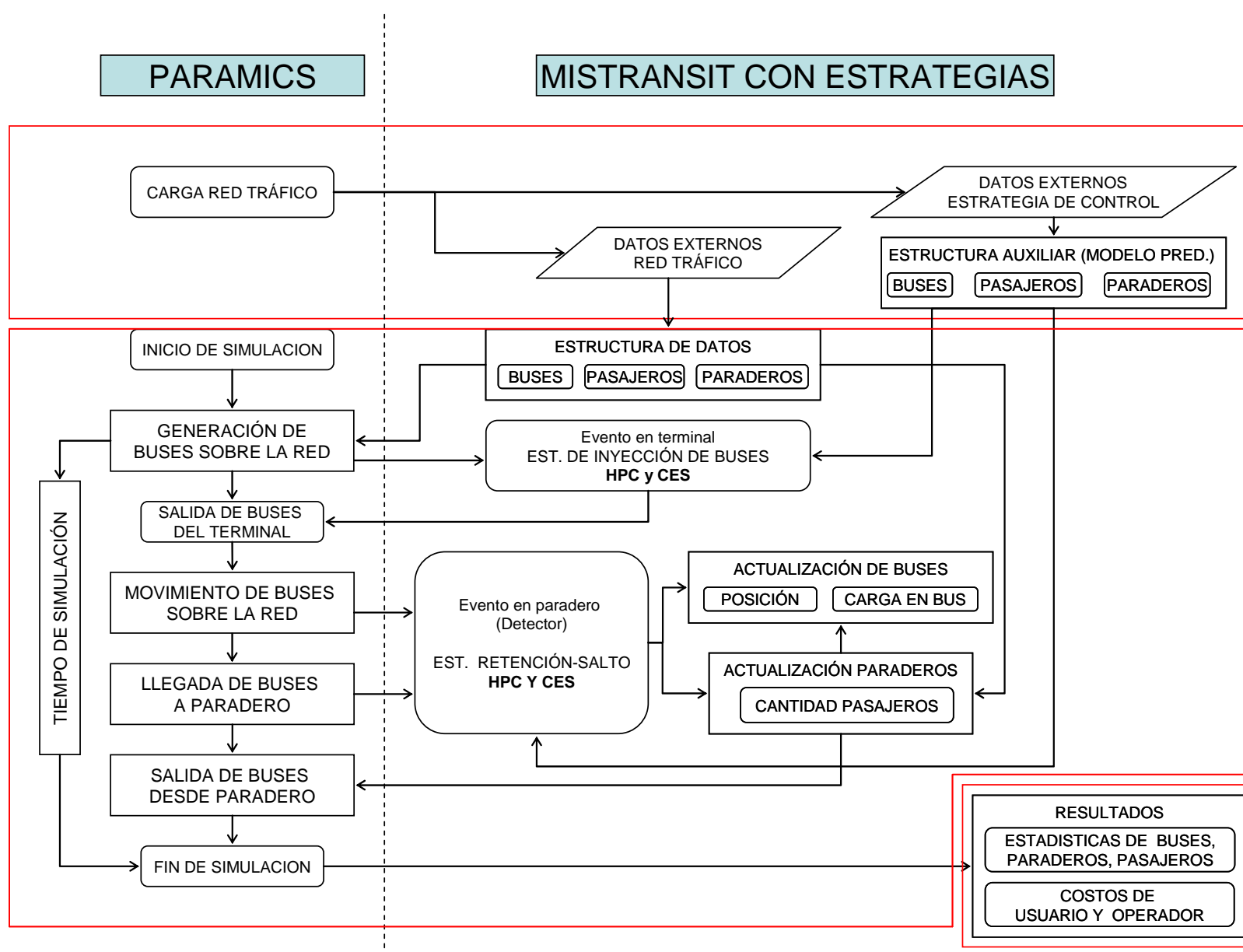


Figura 6.1. Interacción entre PARAMICS y MISTRANSIT CON ESTRATEGIAS

La Figura 6.1 muestra dos partes importantes en el ambiente de microsimulación. Por una parte, el software propiamente tal con las funciones específicas que modelan el comportamiento del



sistema y una segunda parte dada por MISTRANSIT CON ESTRATEGIA, cuyo objetivo es extender las funciones de PARAMICS a casos más puntuales que permitan modelar en detalle un aspecto relevante para el operador en este caso, la implementación de un controlador sobre la operación del sistema.

Para llevar a cabo una simulación bajo este nuevo esquema de control en el microsimulador PARAMICS se siguen tres etapas, que se identifican mediante rectángulos en orden creciente en la Figura 6.1 y corresponden a las siguientes etapas:

- 1.- Cargar una red de transporte
- 2.- Desarrollar la simulación
- 3.- Reportar resultados

#### *1.- Cargar una red de transporte*

El paso inicial es cargar la red de transporte calibrada previamente en el microsimulador. Se deberá incluir también los datos externos, en formato de texto (\*.txt), en el archivo raíz de PARAMICS. Los archivos de entrada pueden ser de dos tipos: los obligatorios que están relacionados con la red de transporte y los opcionales que están asociados al controlador predictivo o controlador experto; dependerá de cual de estas opciones se escoja para que opere sobre el sistema.

Los datos externos están asociados a la operación del sistema; específicamente se trata de información relevante para la operación del sistema, incluyendo características de la operación de buses, comportamiento de los usuarios, entre otros. Por ejemplo, se especifican los paraderos que son servidos por cada línea de bus, los tiempos de despacho de cada servicio (bus) desde el terminal. Los datos externos asociados a la red define el tamaño de las estructuras auxiliares para categorías tales como bus, paradero y pasajero. Estas estructuras almacenan durante la simulación información que se utilizará en los reportes finales, tales como tiempos de espera de los usuarios, tiempo de salida de un bus desde un paradero, tasa de ocupación de cada bus, cantidad de personas esperando en cada paradero, entre otros. La información se actualiza en cada evento a lo largo de la simulación mediante las variables de estado definidas en el diseño del controlador. Cada vez que se genere un evento, el modelo predictivo parte de aquel estado actual y reproduce el sistema bajo escenarios posibles con y sin acciones de control en horizontes de predicción  $Np$ .

Los datos externos relacionados con las estrategias de control son específicos de cada una. Por ejemplo, para la inyección de buses existe la variable de decisión, unitaria o nula, que permite implementar la estrategia de inyección de buses. Así también, la estrategia de retención-salto cuenta con su variable de decisión. De esta manera, se establecen combinaciones de estrategias de transporte que operan sobre el sistema. Para la estrategia de control predictivo ya sea inyección, retención - salto de estación se adicionan parámetros de control, así como la magnitud de los ponderadores de la función objetivo y el horizonte de predicción  $Np$ .

Las estructuras de datos creadas durante la simulación constituyen un elemento decisivo para su duración. Así, un sistema operando con un controlador predictivo híbrido, con horizonte de predicción alto y con una red de transporte con muchas variables de entrada, puede generar estructuras de datos auxiliares más grande para el modelo predictivo, lo que se traduce en mayor tiempo de análisis y de simulación.

## 2.- *Desarrollar la simulación*

De forma muy general, la etapa de desarrollo de la simulación comprende el ingreso de la flota de buses y usuarios al sistema; también el desplazamiento e interacción de los buses con los usuarios en paradero, y finalmente la salida de la flota del sistema. Estas etapas están incluidas en las versiones anteriores de MISTRANSIT, ver Cortés *et al.* (2010).

Cuando la simulación se inicia, las estructuras de datos almacenan información permanente de operaciones específicas de buses, de usuarios y de paraderos. Por ejemplo, se registra el paso de un bus de un arco a otro, el caso de arribo de un bus a un paradero o el paso sobre un detector localizado en un arco de la red de transporte. Contrariamente, las estructuras auxiliares son unidades de memoria temporales que están disponibles mientras se evalúa una estrategia de control y una vez que se decide la acción de control, la información se elimina de los registros.

Los buses son despachados desde terminal en base a una programación establecida y cada vez que esto ocurre se genera un “evento en terminal”, utilizado por la estrategia de inyección de buses en ciclo corto.

En el ambiente de simulación de PARAMICS, los lugares donde los buses inician su recorrido son paraderos ficticios dentro del corredor y están perfectamente identificados. Sin embargo, no se realiza detenciones por transferencia de pasajeros porque no existen usuarios en esos paraderos.

Adicionalmente, cada bus ingresa al sistema vacío y es en el primer paradero útil donde empieza su servicio. El primer paradero se localiza muy cerca del paradero ficticio. Los paraderos ficticios son declarados dentro de los datos externos de la red de transporte que entrega MISTRANSIT al microsimulador PARAMICS. El desplazamiento de buses a lo largo del corredor y su interacción con los usuarios en paradero generan “eventos en paradero” que fueron codificados mediante un artificio. Los buses durante la simulación tienen que ser reconocidos antes de llegar al paradero mediante el uso de un detector localizado en el arco de dicho paradero, porque la posible estrategia de salto tiene que ser decidida antes de que el bus se detenga en paradero.

Los eventos en paradero y en terminal conllevan la actualización de sus respectivas variables de estado, tales como tiempo de arribo de un bus a un paradero, cantidad de usuarios en paradero y tiempo de salida del bus desde el paradero, entre otras. Cuando las variables de estado se actualizan, estas son entregadas por MISTRANSIT al microsimulador PARAMICS para que éste lo ejecute y se retome la simulación.

El evento en paradero programado sobre un detector en la red se utiliza para evaluar la estrategia de retención y salto, tanto para el controlador experto simple como para el predictivo híbrido. En el caso del evento en terminal, éste se utiliza para la estrategia de inyección de buses en ciclo corto. La inyección es análoga a incorporar un bus al sistema como lo hace MISTRANSIT con los buses programados originalmente, dado que el bus que se decidió inyectar tiene ya su programación establecida cuando fue evaluado por el controlador.

### 3.- Reportar resultados

Cuando se alcanza el tiempo de simulación establecido, se evalúa la información registrada a lo largo de la simulación y se ordena en reportes de salida, tales como estadísticas de buses, de paraderos, entre otros. Adicionalmente se entrega información de costos tanto del operador como del usuario. A partir del diagrama de flujo de la Figura 6.1 se describe por separado los controladores experto simple y predictivo híbrido.

## 6.2 Diseño del controlador experto simple

El controlador experto simple (CES) se basa en reglas y entrega la mejor acción de control dada una variable(s) de entrada por tipo de estrategia utilizada. Así, en la Figura 6.2 se muestra el diagrama de bloques del controlador experto con estrategias de retención, salto de estación e inyección de buses que se describió en el capítulo 4.

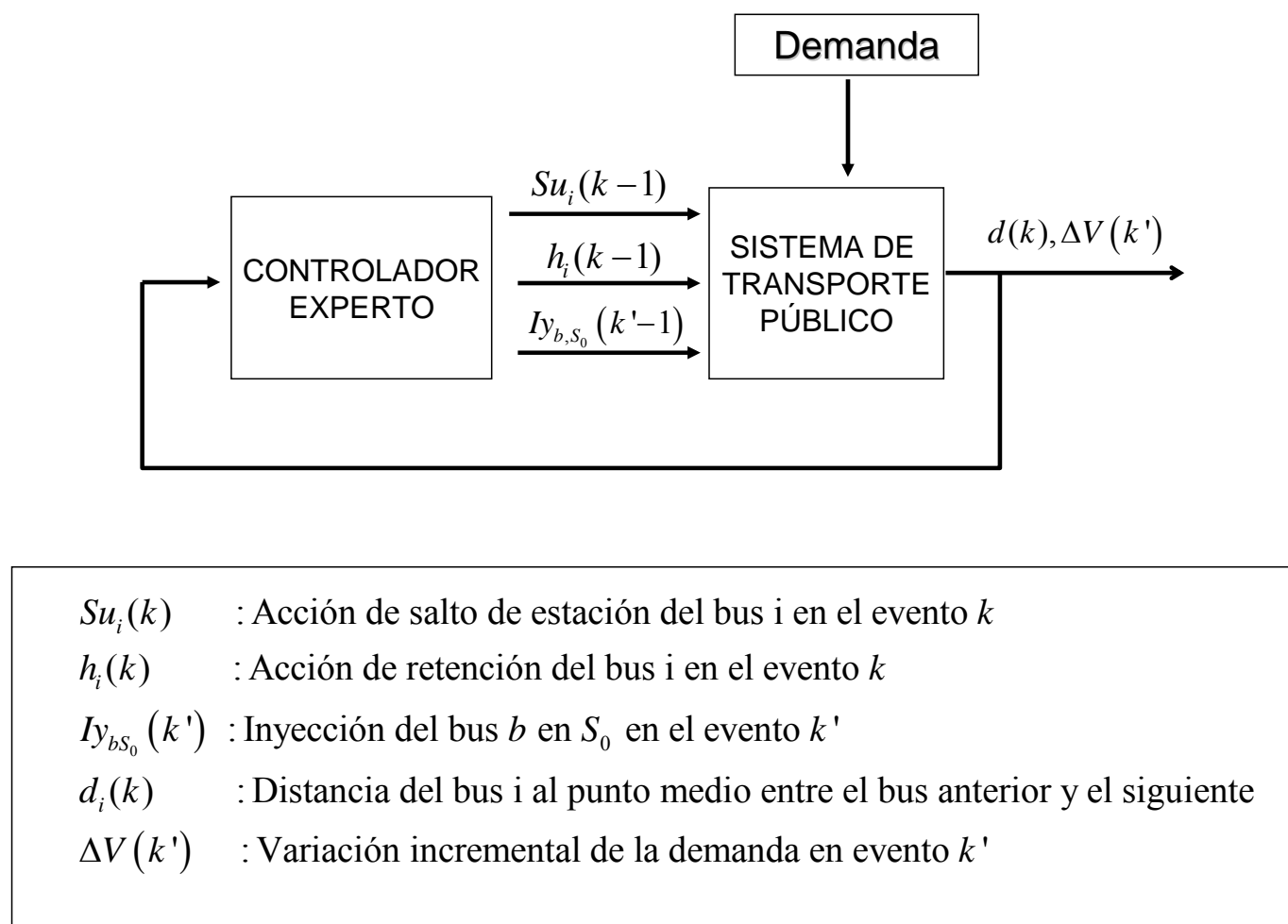


Figura 6.2. Esquema del controlador experto con estrategias múltiples

Las variables de entrada dependen de la estrategia de control escogida; así para la estrategia de retención y salto de estación, la variable de entrada es la distancia media de los buses adyacente

respecto del bus analizado  $d_i(k)$ , mientras que para la estrategia de inyección de buses la variable de entrada es la carga por tramo,  $\Delta V(k')$ .

Una parte importante para el diseño del controlador es el instante de evaluación del sistema y el de entrega de la acción de control. El instante de evaluación corresponde al de generación de eventos que difiere por tipo de estrategia utilizada. El controlador experto con estrategias de retención y salto de estación se basa en la generación de eventos en paradero mediante detectores, mientras que el mismo tipo de controlador con estrategia de inyección de buses en ciclo corto se basa en generación de eventos en terminal.

El controlador experto como se mencionó anteriormente evalúa todo el sistema en tiempo real. La evaluación del sistema es local, para las estrategias de retención y salto de estación y se lleva a cabo cada vez que se genere un evento en paradero. Se considera una evaluación local porque el análisis se limita a la ubicación geográfica de un bus respecto de sus dos buses adyacente emplazados en el corredor de buses. En cambio, en el caso de la estrategia de inyección la evaluación es global, porque involucra el perfil de carga de todo el corredor de buses. Las variables mencionadas, posición y demanda junto con la base de reglas respectiva entrega la mejor acción de control que se aplica en tiempo real para enfrentar el problema de transporte detectado.

Las bases de reglas utilizadas son dos, una para retención-salto y otra para inyección. El primer tipo está asociado a las estrategias de retención y salto de estación que tienen como objetivo regularizar la distancia entre buses pese a que éstas se contraponen y por tanto sólo una de ellas debe ser aplicada por evento generado. La segunda base de reglas se aplica a la estrategia de inyección de buses en ciclo corto cuando existe la necesidad de aumentar buses en la operación del sistema dado que existe una demanda que no puede ser satisfecha con la flota existente. En todos los casos, la acción de control proveniente del controlador y se aplica en tiempo real. La retención se ejecuta luego de la transferencia de pasajeros en el instante que haya definido el controlador; el salto se decide antes de ejecutarlo en paradero y la inyección se ejecuta una vez que se cumpla el tiempo de inyección definido por el controlador.

La programación de la operación del controlador experto, como extensión del MISTRANSIT, se divide en tres etapas: la primera de generación de eventos y captura de datos de entrada, una segunda etapa de uso de la base de reglas y entrega de la acción de control y finalmente una tercera de implementación de la estrategia de control en PARAMICS que conduce la operación del proceso. La programación en detalle por tipo de estrategia considerada se describe a continuación.

### **6.2.1 Estrategia de retención y salto de estación**

El diseño del controlador experto simple con estrategia de retención y salto descrito en el capítulo 4 se implementa en el microsimulador PARAMICS con una adaptación. El modelo propuesto opera en base a generación de eventos en paradero. Sin embargo, para que la simulación del controlador sobre el proceso sea factible, es necesario que la acción de control sea entregada al operador y aplicada antes que el bus arribe al paradero.

Con este antecedente, en el ambiente de simulación, el controlador experto simple se activa cada vez que se genere un evento en un detector ficticio que representa al evento generado en paradero. El evento corresponde al paso de un bus sobre el detector que está localizado a poca distancia del paradero de control. De esta manera se pretende emular la generación de evento en paradero para mantener la modelación original y establecer comparaciones.

El detector ficticio está ubicado a una distancia menor de 30 m. del paradero de control. Optimizar su ubicación podría ser objeto de un trabajo futuro. Los paraderos de control son aquellos lugares de detención donde se puede aplicar la estrategia de salto de estación o retención de bus en paradero. Los posibles paraderos de control pueden ser escogidos en número y ubicación, sin embargo en este trabajo se escogieron todos los paraderos excepto el primero y último paradero del recorrido tanto del corredor completo como del ciclo corto, para cada línea de bus.

El diagrama de flujo de la operación del controlador experto simple con estrategia de salto y retención se presenta en la Figura 6.3

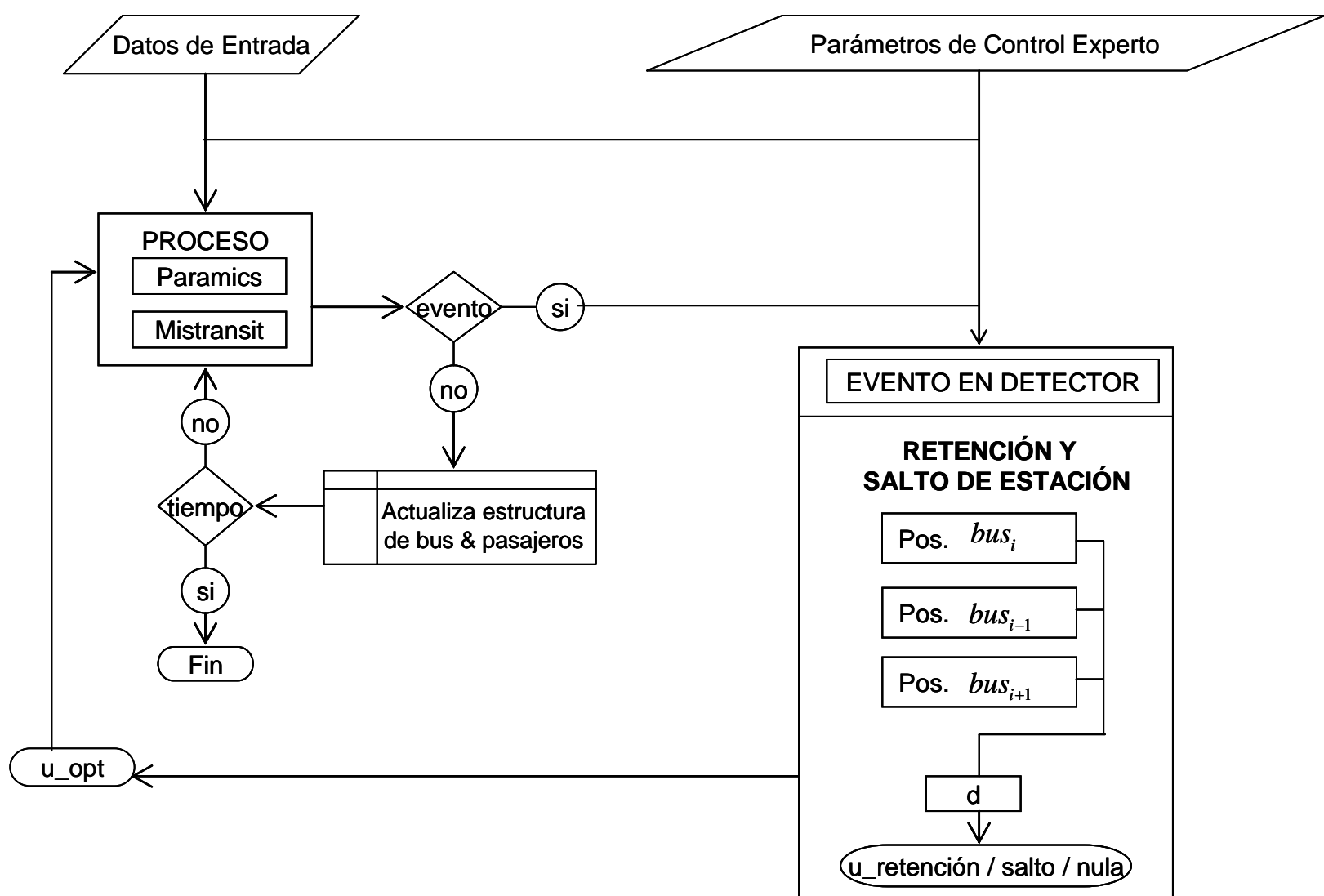


Figura 6.3 Diagrama de flujo del controlador experto simple con estrategia de retención y salto.

El diagrama muestra que durante la operación del sistema (proceso) se generan eventos y cada vez que se registre uno y se encuentre activado el controlador experto, la base de reglas será utilizada para analizar la condición de cercanía del bus  $i$  que generó el evento con los buses

adyacentes. De este análisis se obtiene la distancia relativa  $d_i(k)$  que asociada a la regla respectiva entrega la acción de control factible, sea retención, salto o acción de control nula.

Para programar la metodología expuesta en la plataforma MISTRANSIT se utiliza la función, `qpx_TGV_timeStep (VEHICLE* v)`, que se activa en cada paso de la simulación en busca de algún bus dentro de la red de transporte que se encuentre sobre un detector ficticio, que genere un evento y por tanto active el controlador experto simple con estrategias de retención y salto de estación. El bus que genera el evento sobre el detector ficticio se denomina  $bus_i$  y es el que activa el controlador experto; en ese instante se localiza los dos buses más próximos de la misma línea de bus en el corredor, uno aguas arriba y otro aguas abajo.

Para localizar el bus aguas arriba  $bus_{i-1}$  se realiza una búsqueda por arcos a lo largo de la ruta del  $bus_i$  que es la misma del  $bus_{i-1}$  y del  $bus_{i+1}$ , como se muestra en la Figura 6.4.

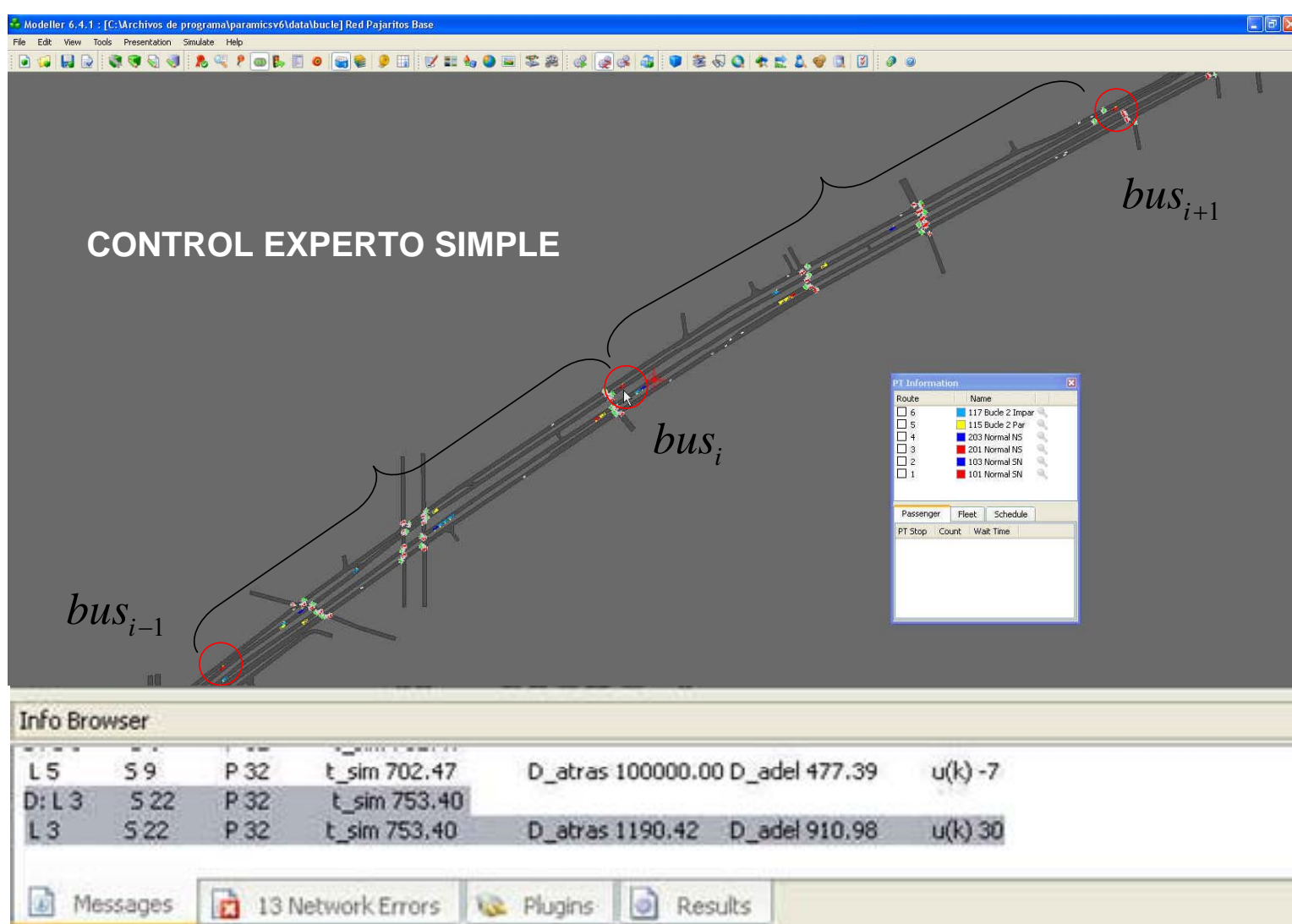


Figura 6.4. Localización de buses adyacentes una vez que el bus  $i$  genera un evento en paradero

Una vez localizado el arco donde se encuentra ya sea el  $bus_{i-1}$  o el  $bus_{i+1}$ , se identifica la pista por el que circula y finalmente se calcula la distancia de este bus respecto al  $bus_i$ . Con las distancias atrás y adelante se obtiene la distancia  $d_i(k)$  que relaciona la ubicación del  $bus_i$  respecto a la ubicación del intervalo medio ( $D/2$ ) entre los buses inmediatamente adelante y

atrás. La distancia  $d_i(k)$  es la variable de entrada del controlador experto simple y en base a las reglas se entrega una acción de control en tiempo real.

La base de reglas relaciona la variable de entrada  $d_i(k)$  y entrega la acción de control  $u(k)$ . Las acciones de control posibles son:

$$u(k) = \begin{bmatrix} Su_i(k) & \text{Salto de estación} \\ h_i(k) & \text{Retención en paradero} \end{bmatrix}$$

Y la base de reglas que se utiliza para el experimento de validación es la siguiente:

Si	$d_i(k) < 0$	, entonces	$u(k) = Su_i(k) = 1$
Si	$d_i(k) = 0$	, entonces	$u(k) = 0$
Si	$0 < d_i(k) \leq 125$	, entonces	$u(k) = h_{15}$
Si	$125 < d_i(k) \leq 250$	, entonces	$u(k) = h_{30}$
Si	$250 < d_i(k) \leq 500$	, entonces	$u(k) = h_{60}$
Si	$500 < d_i(k) \leq 750$	, entonces	$u(k) = h_{90}$
Si	$750 < d_i(k)$	, entonces	$u(k) = h_{95}$

Donde,  $d_i(k)$  es la distancia relativa medida en metros, que está comprendida entre los límites obtenidos del tiempo que un vehículo se demoraría en recorrer esa distancia para realizar la acción de retención del vehículo, como se explica en el capítulo 4.

$Su_i(k) = 1$  es la acción de salto de estación y  $h_{30}$  es la acción de retención de 30 segundos en el paradero de control luego de la transferencia de pasajeros. Durante el tiempo de transferencia no se permite abordar el bus. Los tiempos de retención que se aplican pueden ser del orden de 30, 60, 90 y 95 segundos.

La acción de salto de estación se aplica sólo si no existen usuarios que desciendan en ese paradero; esto es posible por cuanto se asume que se cuenta con información del origen y el destino de cada usuario del sistema.

La Figura 6.5 muestra una simulación en desarrollo, que corresponde a uno de los experimentos realizados en este trabajo con la aplicación del controlador experto en el corredor segregado de buses de la Av. Pajaritos.

Cuando el bus  $i$  pasa por el detector ficticio, se identifica la línea a la que pertenece y si el próximo paradero de detención es un paradero de control. En el ejemplo, el servicio N° 5, que es el bus 2 de la línea 1 se detendrá efectivamente en el paradero de control N° 10. El control experto se activa y bajo estas condiciones PARAMICS despliega el siguiente mensaje que muestra la distancia (27.35 m aprox.) a la que se encuentra el bus de adelante de la misma línea

Nº 1. El siguiente mensaje despliega la distancia del bus de atrás de la misma línea, que corresponde a 80.55 m aproximadamente.

Con estas distancias reales de los buses adyacentes se evalúa en la base de reglas la acción de control pertinente que se aplica una vez que el bus arribe al paradero.

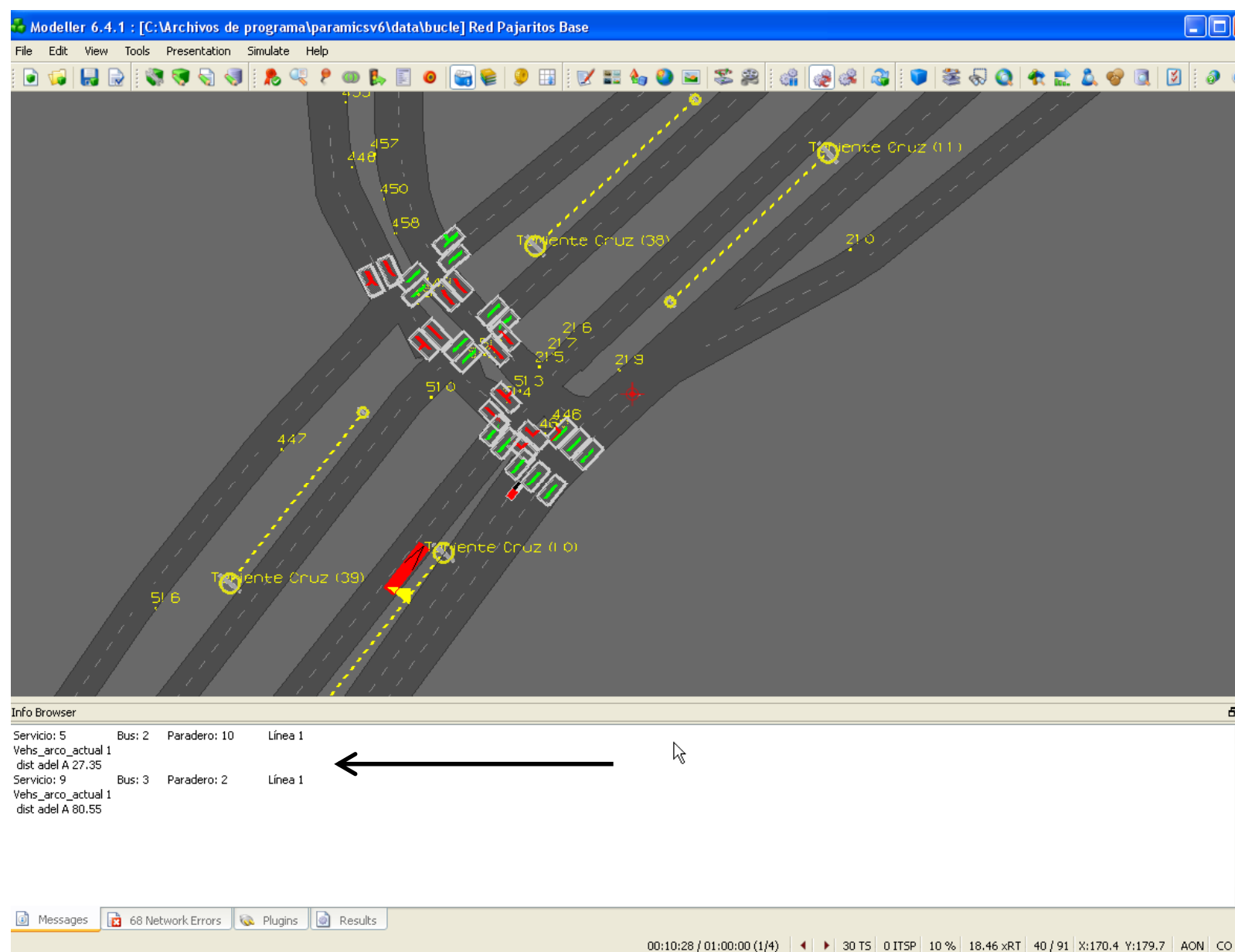


Figura 6.5. Interfaz gráfica de salida en PARAMICS con control experto simple

## 6.2.2 Estrategia de inyección de buses en ciclo corto

La programación del controlador experto con inyección de buses mantiene el mismo principio que el controlador predictivo híbrido. La programación del controlador experto con inyección es más sencilla, porque no requiere predecir el comportamiento futuro del sistema de transporte, resultando suficiente registrar la demanda actual y compararla con una demanda base referencial. En esta estrategia se consideran eventos en terminal; por lo tanto, cuando un bus es despachado desde el terminal, se evalúa la demanda en todo el sistema, específicamente la cantidad acumulada de pasajeros por tramo de corredor. De ellos se escoge el máximo volumen por tramo registrado y se compara con la demanda referencial. Este incremento es el indicador que determina la adición o inyección de un bus al sistema. La magnitud del incremento de la demanda permite por una parte inyectar buses y por otra planificar el diseño de la operación de



buses en ciclo corto, como se describe en el capítulo 4. El diagrama de flujo de la Figura 6.6 muestra el procedimiento para programar la estrategia de inyección de buses como acción de control del experto simple.

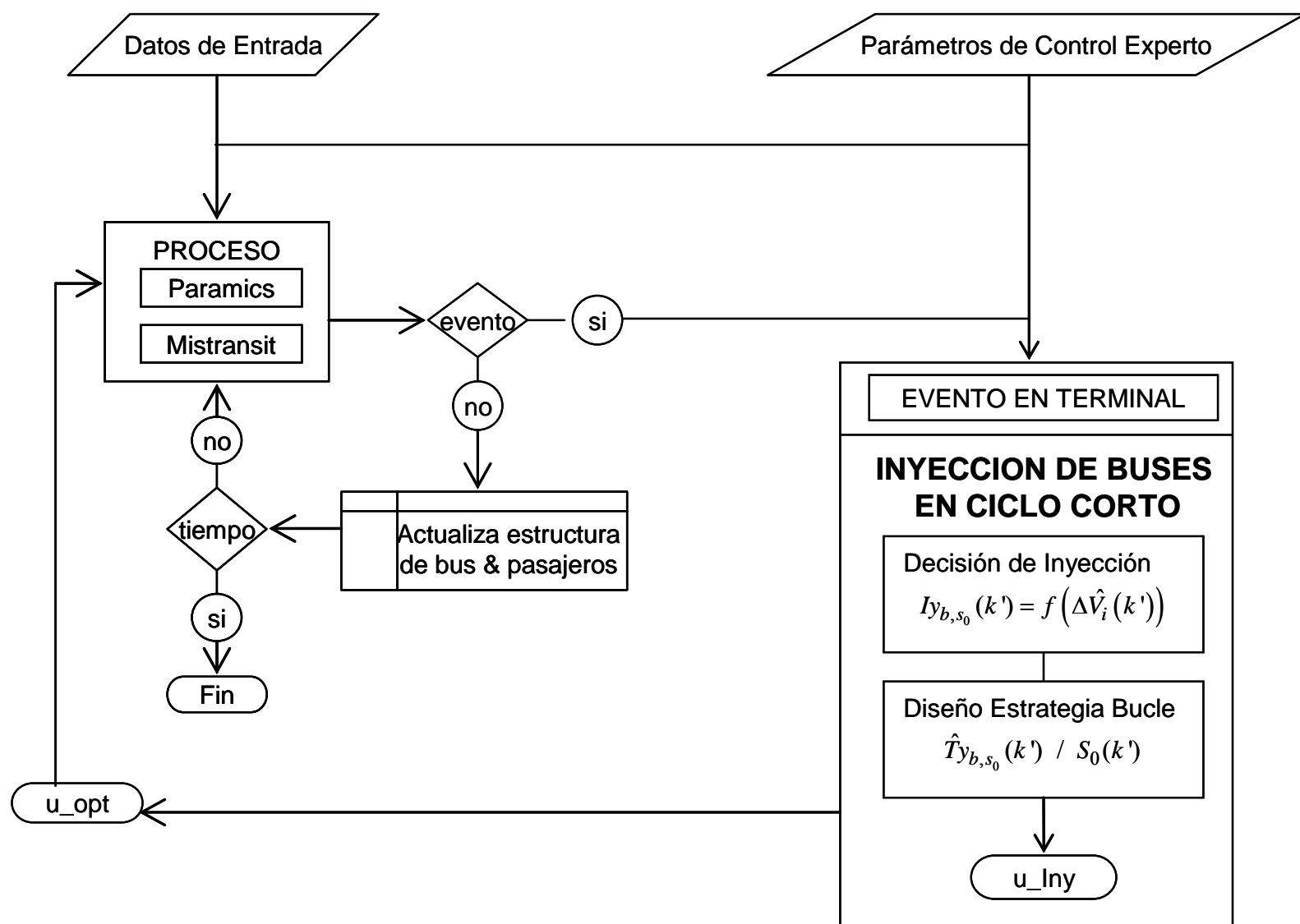


Figura 6.6.- Diagrama de flujo del controlador experto simple con inyección de buses

La etapa inicial de lectura de datos externos, tanto de la red y de los parámetros del controlador, fueron explicados anteriormente en la sección 6.1. La programación de la estrategia de inyección a ser implementada en el microsimulador tiene las siguientes características:

### 1. Detección inesperada de la demanda

La detección de esta señal aleatoria mayor se realiza mediante la comparación de un indicador de la demanda en tiempo real (tasa real) y uno de la demanda de diseño (tasa de diseño), si la demanda real es superior en un 50 % a la demanda de diseño en cualquier tramo dentro del ciclo corto predefinido a priori, entonces se incorpora al sistema un bus tipo  $b$  que opera en el ciclo corto.

### 2. Diseño de la estrategia de inyección de buses en ciclo corto

Para la programación de operación de buses en ciclo corto se considera el máximo incremento de la demanda,  $\Delta V_i(k')$ , registrado en el evento en terminal  $k'$ . Como primera aproximación se considera que todo el incremento de la demanda (50%) se asigna a él o los buses que se

inyectan en ciclo corto. Como trabajo futuro se sugiere que la demanda debiera ser desagregada por tipo de mercado, específicamente se refiere a particionar la demanda en aquellos que utilizarán exclusivamente la flota que opera en ciclo corto y en el corredor completo. Para ello se asume que se cuenta con información de los destinos de los usuarios.

El incremento de la demanda requiere reprogramar la operación de la flota de buses, para lo cual se calcula parámetros de diseño tales como; tiempo de inyección que está asociado al intervalo de diseño  $H_b^*(k')$ , tamaño de flota  $F_b^*(k')$ , número de buses a inyectar y el paraderos de inicio  $S_0(k)$  y fin  $S_1(k)$  de ciclo corto; estos últimos están definidos a priori en el experimento de validación, por lo que se asume conocidos en el desarrollo del código.

Los tres primeros parámetros se explicaron con detalle en el capítulo 4. El número de buses a inyectar se obtuvo a través de la relación entre las frecuencias  $f_a$  y  $f_b$ .

Si se considera que en cada intervalo  $H_a$  opera un bus  $a$  en operación normal y que al inyectar buses tipo  $b$ , estos deberían hacerlo dentro del intervalo  $H_a$ , entonces, el número  $N_{H_a}$  de buses  $b$  que opera con intervalos  $H_b$ , dentro de un intervalo  $H_a$  está dado por la expresión (6.1).

$$N_{H_a}(k) = \frac{f_b^*(k)}{f_b^*} \quad (6.1)$$

Cuando se decide inyectar un bus  $b$  y se tiene el tiempo programado de inyección  $T_y$ , MISTRANSIT ordena al microsimulador la entrada del bus  $b$  al sistema por medio de una función específica del *programmer*, (`qpx_VHC_release(VEHICLE* vehicle)`). Una vez que el bus  $b$  entra en la red, el bus adopta el comportamiento programado por MISTRANSIT para la flota que opera en ciclo corto y al igual que la flota  $F_a$ , toda la información es guardada en estructuras de datos.

Las líneas que operan el ciclo corto requieren la misma información de datos externos que las líneas de corredor completo. Si bien dentro de los datos de entrada se especifica el tiempo de ingreso de todos los buses a la red, para el caso de los buses que operan en ciclo corto este tiempo es asignado una vez que se decide inyectar dicho bus y corresponden al tiempo de inyección entregado por el controlador.

La estrategia de inyección se activa en el archivo de parámetros de inyección con una variable de decisión unitaria. Es importante mencionar que la red que se cargue para la simulación con estrategia de inyección tendrá tanto las características del corredor completo como las del ciclo corto. Dentro de los parámetros de inyección consta el número de líneas que operan en ciclo corto que son dos líneas que inician la operación en extremos opuestos del ciclo corto y están desfasadas.

Cuando se decide inyectar un bus  $b$  en ciclo corto, se especifica la línea que se inyecta y que tiene asociado el paradero de inicio del recorrido. Así, si el paradero de inicio sobre el tramo

más cargado de la red pertenece a los paraderos pares, entonces se inyecta un servicio o bus que cubra los paraderos pares del ciclo corto.

En los datos externos que se cargan con la red se especifica los paraderos que servirá cada línea de bus inclusive los que operan en ciclo corto.

En la Figura 6.7 se muestra el emplazamiento de un ciclo corto al interior de un corredor de buses. El corredor de buses corresponde al que se utiliza para la validación del diseño mediante simulación que se describe en el capítulo de resultados. El ciclo corto satisface la zona de mayor demanda que se asume conocida y claramente definida por las estaciones de inicio  $S_0$  y fin  $S_1$  del ciclo corto.

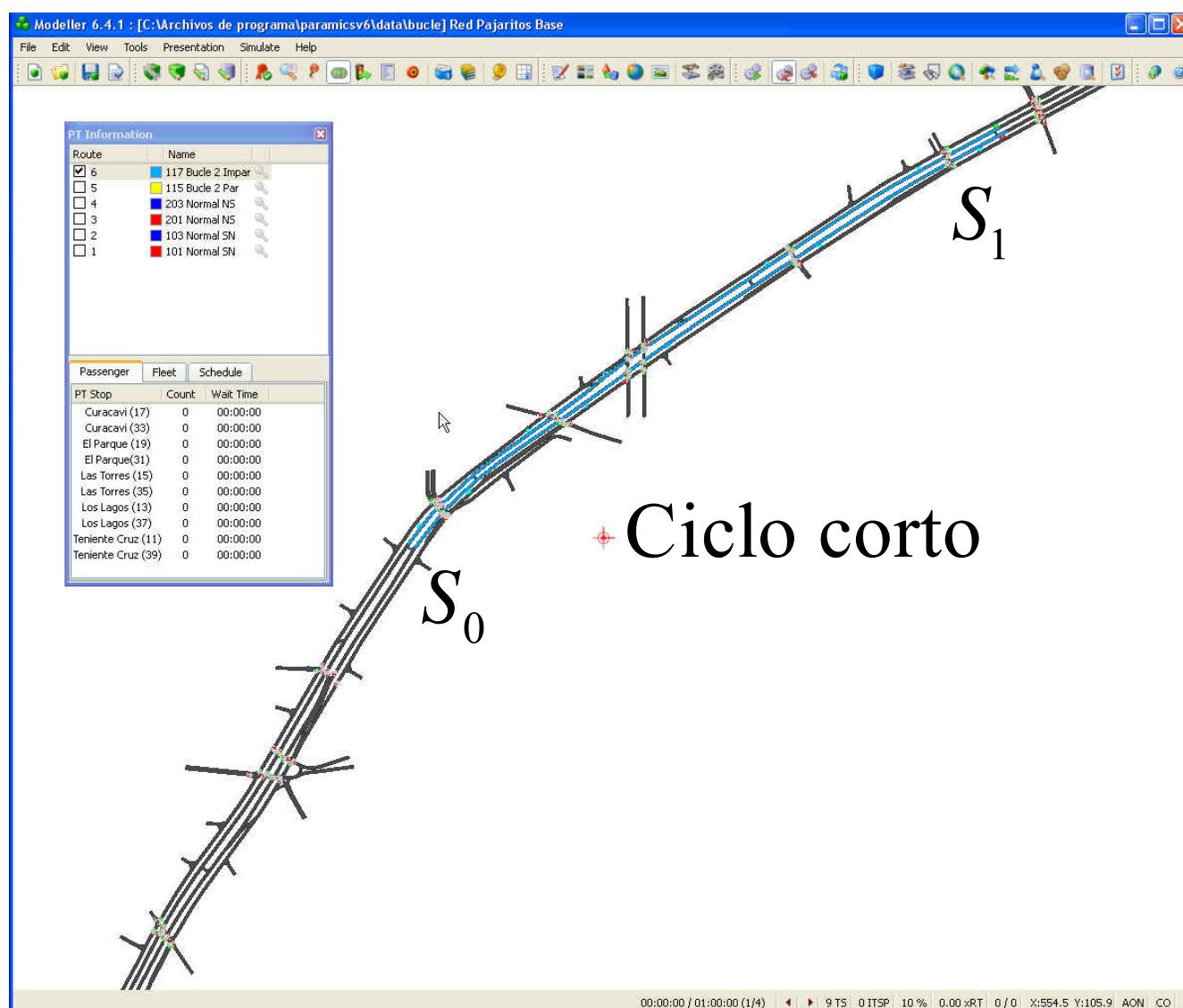


Figura 6.7. Red de transporte modelada con un ciclo corto demarcado.

### 6.2.3 Estrategia integrada

Los controladores descritos anteriormente pueden ser implementados de manera conjunta, como muestra el diagrama de flujo de la Figura 6.8. La acción de control se tomará dado el requerimiento del sistema; así si no existiera un requerimiento de inyección de buses en ciclo corto, entonces el controlador entrega acción de control nula.

Si el sistema tiende a perder regularidad en los intervalos, entonces el controlador experto entrega las acciones de control de retención o salto de estación para solucionar el problema detectado en tiempo real.

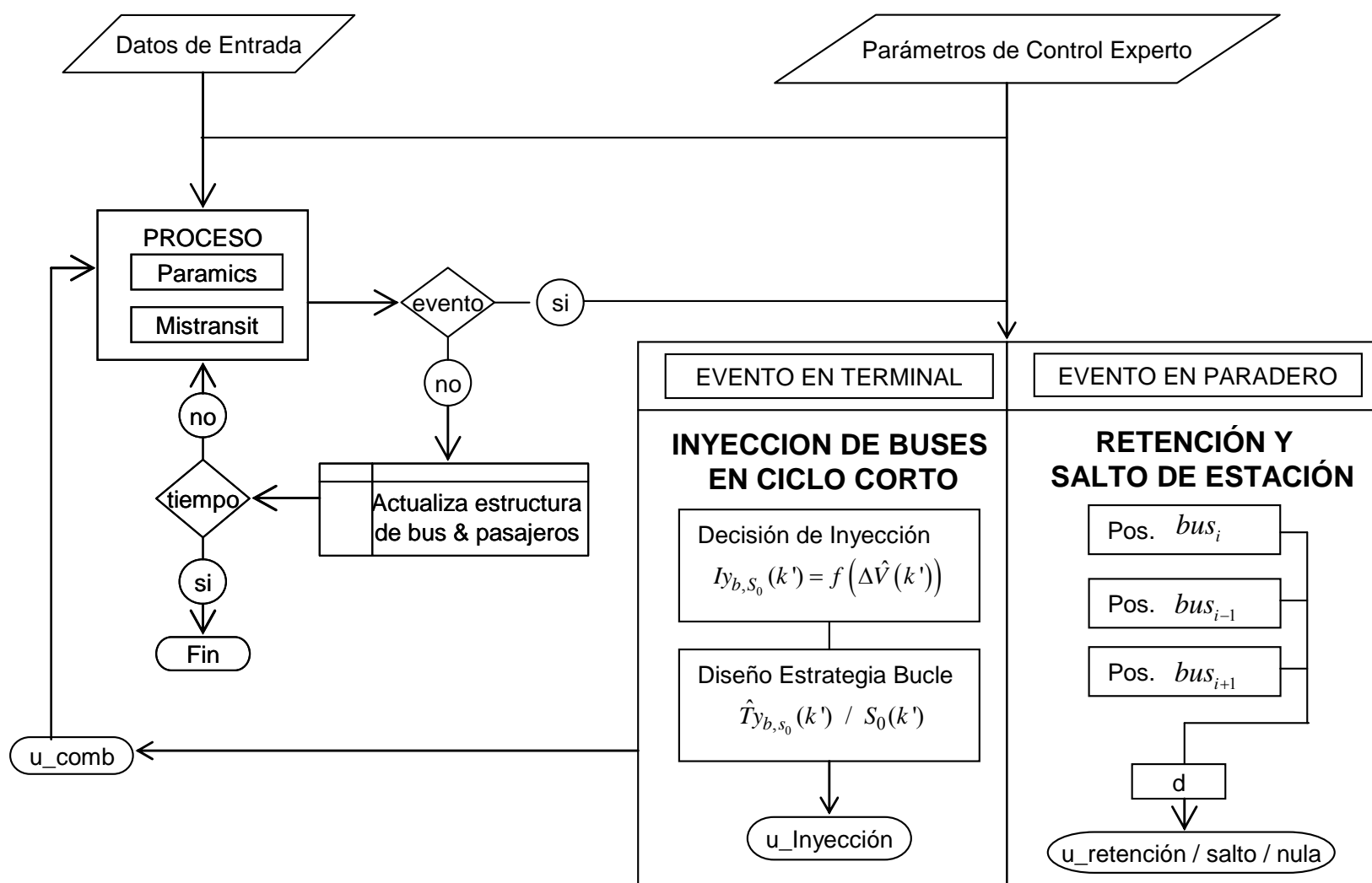


Figura 6.8 Diagrama de flujo del controlador experto simple con estrategias combinadas

Los datos de entrada se refieren a la información de la red, buses, líneas, paraderos y demanda entre otros que se cargan junto con la red de transporte. Por ejemplo, en los datos de servicio se especifica la hora de salida de cada bus y el orden en que aparecerán los buses y la línea a la que pertenecen.

Los parámetros de control de inyección y salto - retención de bus contienen cada una variable de decisión que se activa de forma independiente porque la manera en que fueron programadas.

Los datos externos son entregados a PARAMICS para la simulación. Cuando se produce un evento en paradero se activa el controlador experto escogido, salto-retención y si se produce un evento en terminal el controlador evalúa la estrategia de inyección como posible acción de control. En cada evento se obtiene una acción de control combinada ( $u_{com}$ ) que puede ser cualquiera de las estrategias de control activas.

La acción de control se entrega en tiempo real al sistema y la operación continúa guardando la información por eventos en una estructura específica por tipo de dato, sea paradero, bus, línea ó por tipo de controlador; este procedimiento sigue hasta que termina el tiempo de simulación.

### **6.3 Diseño con control predictivo híbrido**

Para validar el diseño propuesto de un controlador predictivo híbrido con estrategias de retención, salto de estación e inyección de buses en ciclo corto, se utiliza el código programado por Otárola (2009) que contiene las estrategias de retención y salto de estación como parte del controlador predictivo híbrido propuesto por Sáez *et al.* (2010). A esta plataforma base se incorpora el código específico de la estrategia de inyección de buses en ciclo corto que utiliza la generación de eventos en terminal para analizar su factibilidad.

A continuación se explica tres etapas fundamentales en el diseño: en primer lugar las características relevantes de la validación en PARAMICS de las estrategias de retención y salto e inyección de buses en ciclo corto y en segundo, se explica la modelación del sistema en el horizonte de predicción mediante un modelo predictivo que es utilizado por todas las estrategias para escoger la mejor acción de control.

#### **6.3.1 Estrategia de retención y salto de estación**

El diseño del controlador predictivo híbrido mencionado con estrategias de salto y retención de bus en paradero se basa en eventos en paradero. Sin embargo, para validar el diseño mediante simulación es necesario hacer algunas adaptaciones. En primer lugar, es necesario obtener la acción de control instantes previos a que se genere un evento en paradero (arribo de bus a paradero), para ello, Otárola (2009) programa la estrategia basándose en eventos generados en detectores físicos instalados en las cercanías de los paraderos a lo largo del corredor de buses. El paso de un bus sobre el detector activa el controlador predictivo y entrega como resultado la acción de control para ser implementada cuando el bus arribe al paradero. Esta acción de control generada en MISTRANSIT es entregada a PARAMICS para que el bus analizado y generalmente predicho arribe al paradero con una velocidad constante emulando un salto de estación.

Existen dos instancias de generación de eventos en paradero: el primero cuando el evento se genera en tiempo real y el otro cuando se genera dentro del modelo de predicción. Los eventos en paradero generados en el modelo predictivo mantienen la evaluación del sistema cuando se genera el evento en paradero, es decir, la activación del controlador predictivo y su acción de control se realiza una vez que el bus arribe a un paradero y no en el detector ficticio ubicado antes del paradero cuando la simulación se ejecuta de forma normal. Esto porque se trata de un análisis de lo que se haría y de este análisis la variable relevante es la estimación de tiempos de espera de los usuarios más que el tiempo de viaje del vehículo que podría verse afectado por este cambio de generación de eventos, evento en detector físico en reemplazo de evento en paradero.

#### **6.3.2 Estrategia de inyección de buses en ciclo corto**

El diseño de la estrategia de inyección de buses en ciclo corto se basa en eventos en terminal. Cada vez que un bus de la flota  $F_a$  o de la flota  $F_b$  salga de su respectivo terminal genera un “evento en terminal”, cuya nomenclatura es  $k'$ , en este instante se cuantifica la demanda en el corredor y si la demanda por tramo es mayor a una demanda referencial se obtiene tres

parámetros; la decisión de inyectar,  $I_{y_{b,s_0}}(k')$ , el tiempo de inyección  $\hat{T}_{y_{b,s_0}}(k')$  y la línea en ciclo corte que se inyecta,  $L_{bucle}$ .

Estos parámetros ingresan al modelo predictivo programado en MISTRANSIT y predice el siguiente evento, en paradero  $k$  o en terminal  $k'$ , como muestra la Figura 6.9.

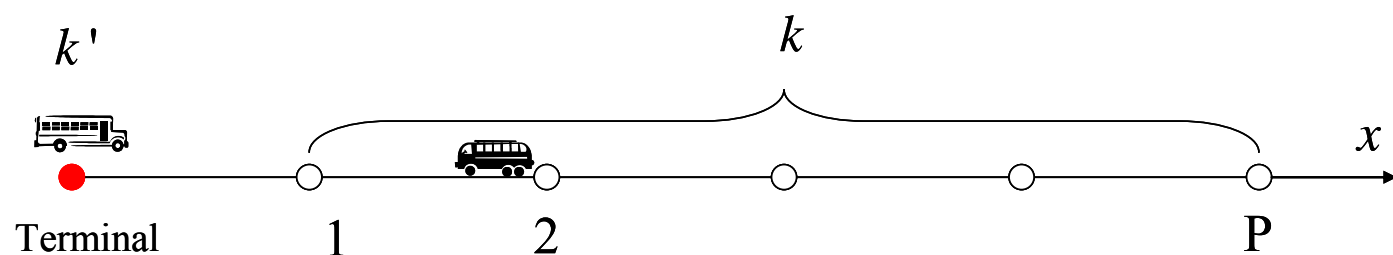


Figura 6.9. Generación de eventos en el diseño de la estrategia de control

Una situación ideal sería que un bus  $b$  pueda ser inyectado en el intervalo de análisis  $H_a(k)$  más próximo, sin embargo, esto no siempre es posible y la inyección se post-pone al siguiente intervalo factible de inyección. De esta manera, se genera un árbol de decisión si se inyecta o no el bus  $b$  en un instante futuro  $(k + \ell)$ .

El árbol de decisión está formado por ramas que representan la variable de decisión binaria de inyección. Si se inyecta o no un bus en el horizonte de predicción  $Np$ . El par de ramas en cada horizonte de predicción y la conformación de las combinaciones futuras permiten obtener un valor de la función objetivo dado el horizonte de predicción.

### 6.3.3 Estrategia integrada

El modelo predictivo del sistema que utiliza el controlador predictivo híbrido es único para las tres estrategias: salto de estación, retención de bus en paradero e inyección de buses. Cada vez que se genere un evento, se activa el controlador predictivo y se evalúa de forma explícita las posibles acciones de control en el horizonte de predicción con el modelo predictivo del sistema.

Cuando se genera un evento en el modelo predictivo, se programa en el código de MISTRANSIT CON ESTRATEGIAS la captura de información relevante del sistema, que permite generar un nuevo estado en el siguiente horizonte de predicción basado en la condición anterior del sistema. Cuando se trata de la simulación, PARAMICS actualiza el sistema. Este nuevo estado del sistema constituye la base del modelo predictivo que es usada por el simulador para estimar eventos futuros basados en las posibles acciones de control que se generen a lo largo del horizonte de predicción. Cada acción de control define eventos diferentes donde las acciones de control serán evaluadas. El modelo predictivo está explícito en el diagrama de la Figura 6.10, que es utilizado cada vez que se genere un evento mientras exista un horizonte de predicción.

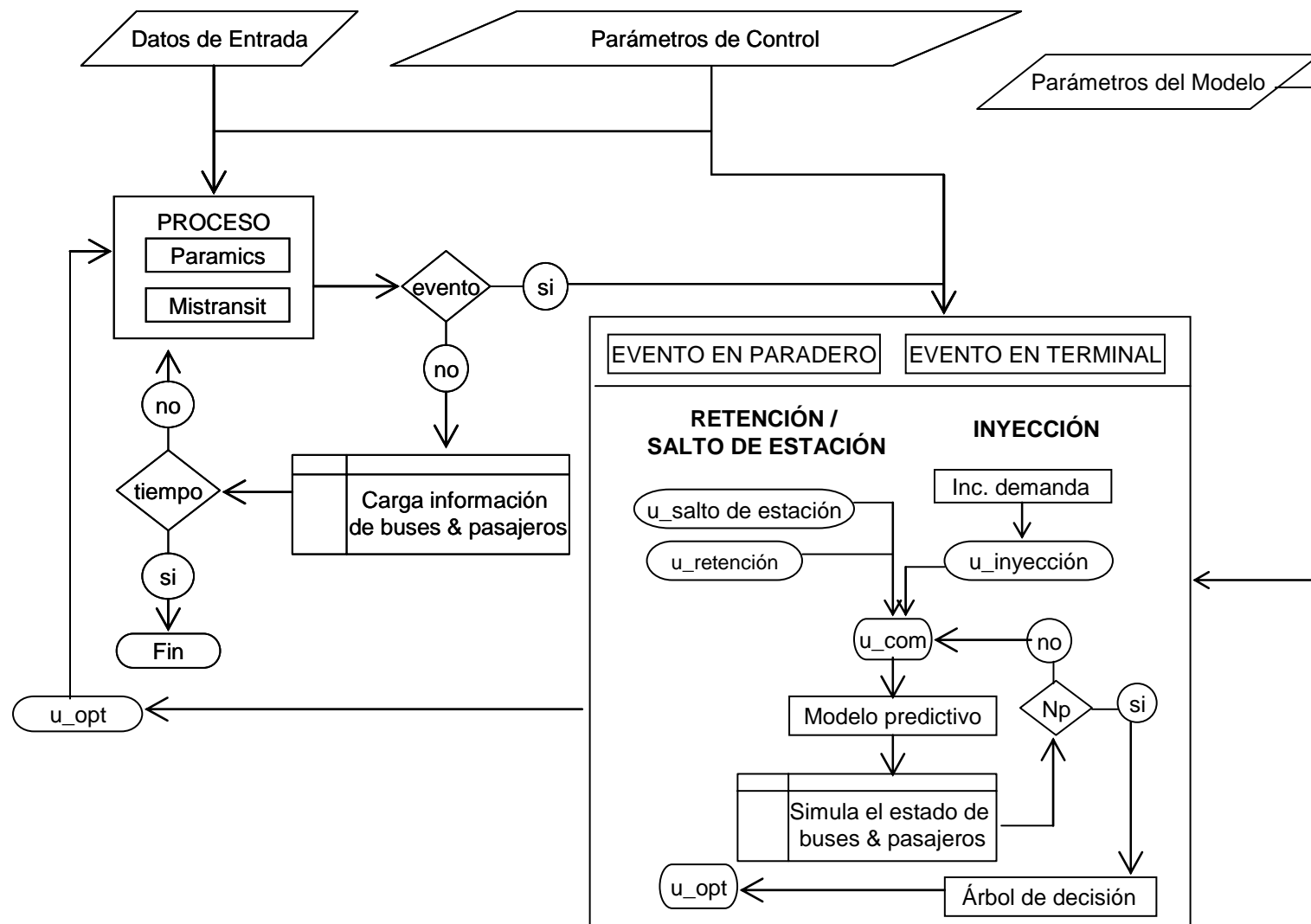


Figura 6.10. Diagrama de flujo de controlador predictivo híbrido con estrategias integradas

Al igual que el control experto, cada vez que se genere un evento ya sea en paradero  $k$  o en terminal  $k'$ , el proceso representado por la operación del sistema es analizado en busca de una acción de control. Si se trata de un evento en paradero, las acciones de control posibles serán de retención, salto o acción nula; mientras que si el evento es en terminal, las acciones posibles son de inyección de un bus o acción nula, esta acción de control está dada por la variable  $u_{com}$ .

El diseño del controlador predictivo híbrido lleva explícita una función objetivo  $J$ , como se describió en el capítulo 5. En la Figura 6.11 se muestra de forma gráfica la generación del árbol de decisión a lo largo del horizonte de predicción  $Np$  para encontrar el valor de la función objetivo. Cada vez que se genere un evento en el instante actual, se predice posibles acciones de control  $u$  a lo largo del horizonte de predicción generando combinaciones de acciones de control que establecen diversos valores en la función objetivo; de todas ellas se escoge la menor.

Cuando el sistema opera con estrategias combinadas, tales como retención, salto de estación e inyección de buses, los eventos posibles son de dos tipos,  $k$  o  $k'$ , que corresponden a evento en paradero o en terminal respectivamente, entonces el evento actual  $K$ , corresponde a uno de los eventos posibles, aquel que se genere primero es decir,  $K = \min\{k, k'\}$ .

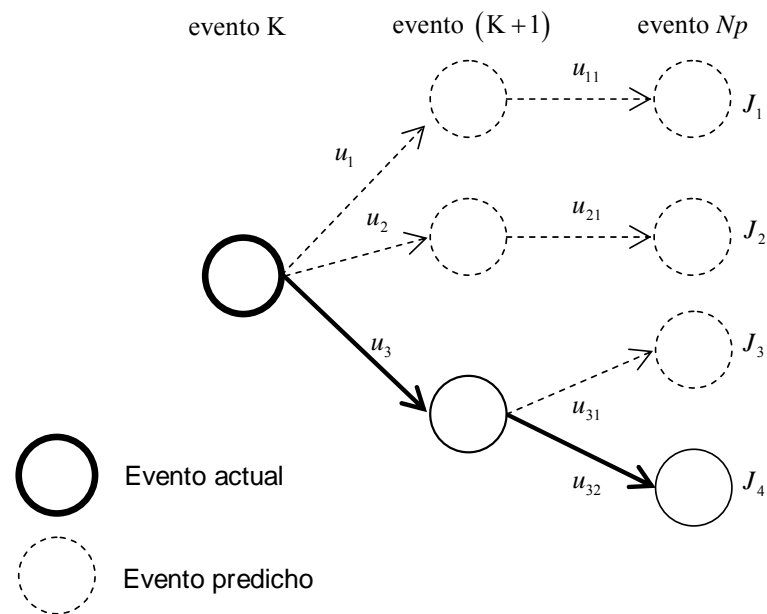


Figura 6.11. Esquema de un árbol de decisiones para acciones de control dadas.

En cada evento actual  $K$  se construye un árbol de decisiones como muestra la Figura 6.11. cuyo tamaño y expansión depende del horizonte de predicción que se escoja y de la cantidad de acciones de control que se disponga. El árbol de acciones de control se forma con todas las posibles acciones de control,  $u(k)$ , que se apliquen en el modelo predictivo dado las estrategias de control que se implementen. Se incluye dentro de las acciones de control la acción de control nula que también será evaluada en cada horizonte de predicción.

En cada horizonte de predicción  $i$ , con  $i = \{1, \dots, Np\}$  se evalúa una acción de control  $u_{ij}(k)$ , asociada a una de las posibles acciones de control  $j$  para ese horizonte.

Por cada acción de control se obtiene un valor parcial de la función objetivo asociado a la implementación de esa acción de control en el modelo predictivo del sistema de transporte público.

El valor de la función objetivo  $J_z$  asociado a la rama  $z$ , corresponde a la sumatoria de las funciones objetivo asociadas a la secuencia de acciones de control, es decir  $\{u_1^z, u_2^z, u_3^z, \dots, u_{Np}^z\} \rightarrow J_z$ .

En cada evento  $K$ , se evalúa el sistema en el modelo predictivo a lo largo del horizonte de predicción en busca de aquella secuencia de acciones de control que minimicen la función objetivo  $J_z$ . De estas secuencias de acciones de control posibles, únicamente interesa aquella primera acción de control, que es la que se implementará en tiempo real; así, si la rama con menor valor en la función objetivo es  $J_z$ , entonces la acción de control que se implementa es  $u_{1j}^z$ , que corresponde a la acción de control  $j$  del primer horizonte de predicción de la rama  $z$  que minimiza la función objetivo.



Para encontrar la acción de control óptima se recurre a un algoritmo de solución para el problema de optimización. En este trabajo se utiliza la enumeración explícita que se programado junto con el modelo predictivo en la plataforma MISTRANSIT CON ESTRATEGIAS. Si el horizonte de predicción es amplio y las posibles acciones de control aumentan la enumeración explícita se torna ineficiente en cuanto al tiempo de ejecución.

Para escoger la mejor acción de control, es indispensable una buena modelación del estado futuro del sistema a lo largo del horizonte de predicción  $Np$ . Para programar esta parte del diseño de la estrategia de control, se parte de un modelo base que captura el estado actual del sistema y sobre éste se modela de forma simplificada el movimiento de buses y arribo de pasajeros en un intervalo de tiempo definido entre el evento actual y el siguiente evento predicho. Este paso generado corresponde a un horizonte de predicción. A partir de este evento predicho se procede de igual forma: se modela el movimiento de buses y pasajeros hasta encontrar el siguiente evento predicho, generando de esta manera más ramificaciones del árbol de decisión. La modelación del sistema en el microsimulador puede ser descrita por las siguientes variables:

$N$  :Conjunto de nodos de la red.

$A$  :Conjunto de arcos de la red.

$v^{ar}$  :Velocidad promedio de buses en el arco  $ar$

$F$  :Conjunto de buses que están operando en la red donde  $F \in \{F_a, F_b\}$

$P$  :Conjunto de paraderos de la red.

La variable de posición de los buses  $F_a$  y  $F_b$  puede ser descrita en el modelo predictivo por su posición en un arco de la red de transporte. La velocidad de los buses se asume conocida y depende del arco en que se encuentre el bus; así cada arco tiene asociada una velocidad promedio para buses obtenida de registros históricos.

Con estos datos se puede estimar el arribo de un bus al siguiente paradero y compararlos con el tiempo programado de salida del siguiente bus del terminal en busca del siguiente evento en el modelo predictivo. Otros parámetros importantes en la modelación son la tasa de ocupación, el tiempo de espera de cada usuario en paradero que se utilizan en la función objetivo y permiten estimar índices de rendimiento del sistema de transporte público.

Para encontrar un evento predicho en paradero, se revisa todos los buses del sistema para observar cual de ellos está más próximo para generar un evento (paradero o terminal). Dado que un bus viaja a través de un arco, hay dos casos posibles: que el bus se detenga dado que existe un paradero o que continúe su movimiento dado que no existe.

En el primer caso, si el bus tienen paradero en el arco, entonces debe detenerse para permitir la transferencia de pasajeros si adicionalmente tiene programada la retención en paradero se suma el tiempo de detención al tiempo por transferencia de pasajeros. En el segundo caso, si no hay paradero en el arco, o el bus debe saltarse el paradero, entonces el bus puede pasar a través del arco sin detenerse. Todas estas posibles situaciones permitirán establecer que bus generará el siguiente evento predicho y el tiempo de dicho evento. Las ecuaciones utilizadas para modelar el movimiento de buses y pasajeros corresponden a las ecuaciones de estado planteadas en el capítulo 5.

## 7 EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

Para la validación del diseño propuesto en el capítulo 6, se realizan experimentos del comportamiento del sistema bajo el efecto de un tipo de demanda (base ó incrementada) y de un tipo de controlador predictivo híbrido (HPC) o experto simple (CES). Los controladores incluyen las estrategias de retención, salto de estación e inyección de buses en ciclo corto como mecanismo de solución al problema de transporte. Este capítulo consta de tres secciones, la definición de la red de modelación, la experimentación de los escenarios de simulación y la presentación de los resultados obtenidos.

### 7.1 Red de modelación en PARAMICS

Los experimentos de validación fueron realizados sobre una red de transporte calibrada en el trabajo de Didier (2008). La red de modelación calibrada corresponde al tramo del corredor segregado de buses de la Av. Pajaritos comprendido entre Vespucio Sur Express al poniente y el camino a Valparaíso (Ruta 68) al oriente. Este corredor constituye uno de los ejes troncales importantes de la región metropolitana.

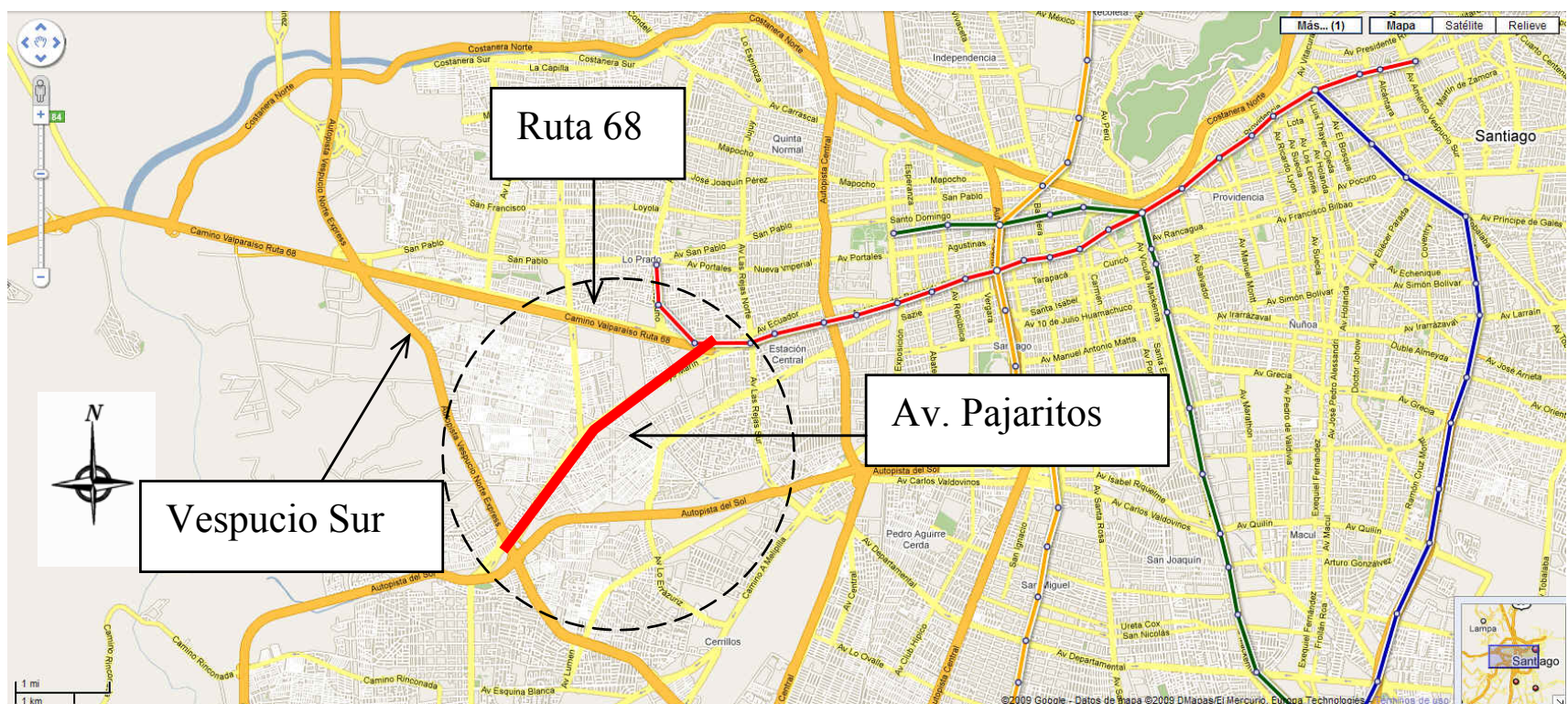


Figura 7.1 Ubicación de la red Pajaritos, Santiago de Chile

La red modelada incorpora información real proveniente de las características viales del corredor de buses, tales como ubicación de paraderos y líneas de buses, así como también características de operación de buses y también factores exógenos a la operación del sistema como la demanda de pasajeros en paradero.

Las características viales se relacionan con el corredor de buses y los paraderos. El corredor tiene una longitud aproximada de 4.1 km con dos a tres pistas por sentido de tráfico. A lo largo del corredor se localizan 44 paraderos que corresponden a 11 paraderos diferidos por sentido que son servidos por 6 líneas de buses, 4 líneas para el corredor completo y 2 líneas para el ciclo corto.

La longitud aproximada del corredor completo es del orden de 8 km mientras que la del ciclo corto es de 4 km aproximadamente. En la Tabla 7.1 se listan los paraderos de poniente a oriente a lo largo del corredor de buses.

Nº	Paradero diferido (par-impar)		Nombre	Distancia [km]	
	Sentido PO	Sentido OP		Parcial	Acumulada
1	2-3	46-47	Alcalde Jorge Délano	-	0.00
2	4-5	44-45	Monte Tabor	0.30	0.30
3	6-7	42-43	Av. Las Parcelas	0.54	0.84
4	8-9	40-41	Hugo Bravo	0.28	1.12
5	*10-11	38-39	Av. Teniente Cruz	0.54	1.66
6	12-13	36-37	Diagonal Los Lagos	0.39	2.05
7	14-15	34-35	Av. Las Torres	0.23	2.28
8	16-17	32-33	Curacaví	0.55	2.83
9	*18-19	30-31	El Parque	0.48	3.31
10	20-21	29-28	Vista Hermosa	0.29	3.60
11	22-23	26-27	Manuel Rivas Vicuña	0.50	4.10

\* Paraderos extremos del ciclo corto

Tabla 7.1. Distancia entre paraderos en el corredor de la Av. Pajaritos  
Fuente: Romero (2008)

Las características de operatividad incluyen información de programación de flotas, intervalos de despacho desde el terminal, tamaño de embarque y otros que requiere la herramienta MISTRANSIT CON ESTRATEGIAS. La Figura 7.2 muestra la red de modelación utilizada en el ambiente del microsimulador PARAMICS.

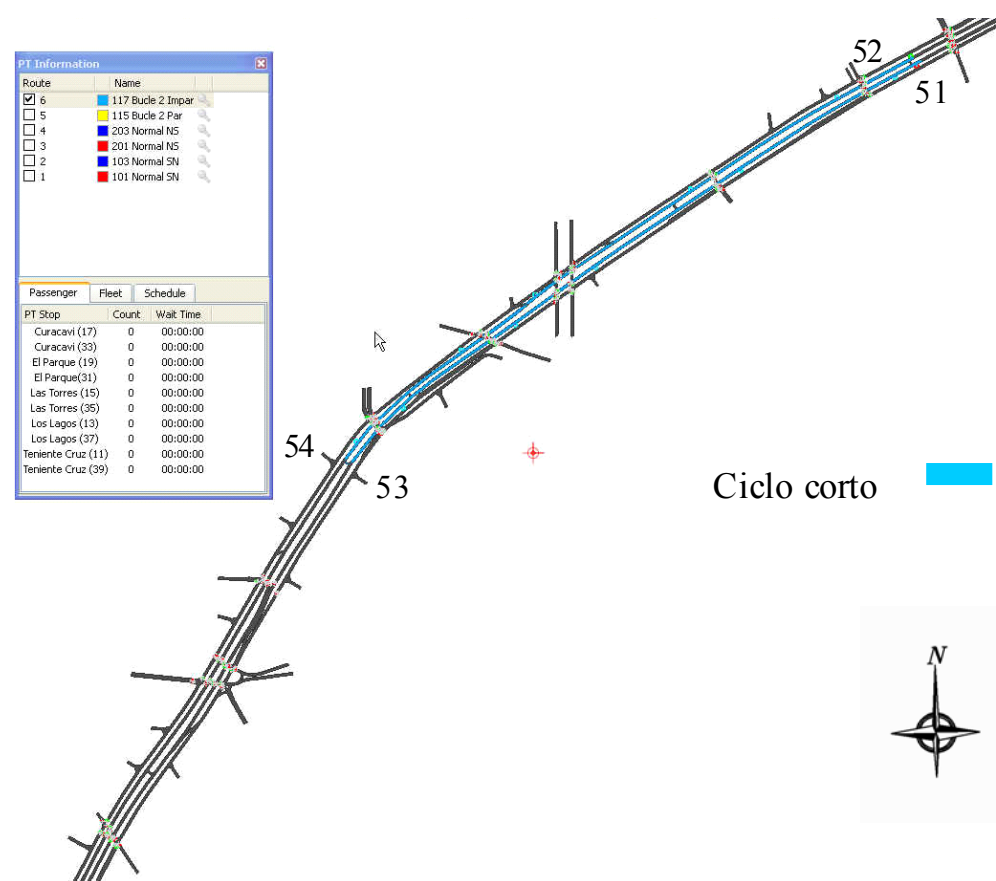


Figura 7.2. Corredor de buses de la Av. Pajaritos con ciclo corto

Las líneas que operan el corredor completo realizan detenciones en paradero par ó impar. Cada línea tiene asignada un tipo de paradero que debe servir, así la línea 2 y 4 realizan detenciones en paraderos pares mientras que la línea 1 y 3 en paraderos impares. Las líneas 5 y 6 operan en el ciclo corto variando entre ellas tan solo el inicio del recorrido. La línea 5 opera los paraderos pares mientras que la línea 6 los paraderos impares. La Figura 7.3 muestra la interacción de las líneas de buses en el corredor completo y en el ciclo corto cuando opera la estrategia bucles.

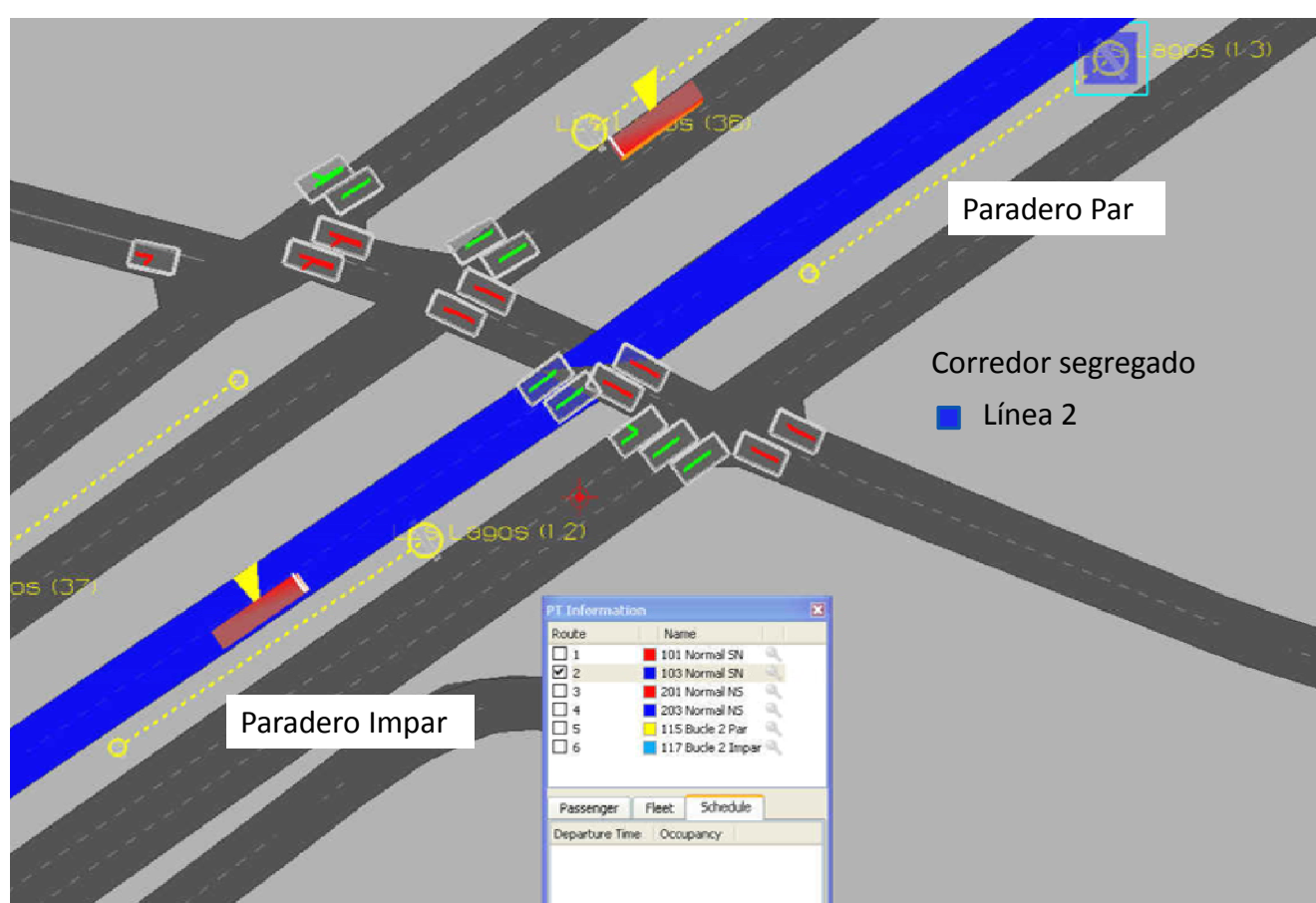


Figura 7.3. Líneas de buses en la red de transporte modelada

La demanda de pasajeros está representada por una matriz de viajes origen-destino, donde tanto los orígenes como destinos corresponden a los paraderos al interior del corredor de buses registrados en un período de medición de una hora. Un aspecto relevante en la modelación es la presencia de transporte privado en la simulación y su reducido impacto sobre el sistema de transporte por la segregación del corredor del buses.

## 7.2 Escenarios de simulación

Los escenarios de simulación consideran dos tipos de demanda, una base y otra incrementada. La demanda base es propia de un sistema de transporte en operación normal. La demanda incrementada corresponde a un sistema bajo una condición inesperada, como el caso de llegada excesiva de usuarios a paradero, para lo cual es necesaria la estrategia adicional de inyección de buses en ciclo corto además de las tradicionales de retención y salto de estación. La Tabla 7.2 resume los controladores utilizados para cada escenario de demanda con las correspondientes estrategias.

Demanda	Controlador	Nomenclatura	Estrategias de transporte		
			Retención de bus	Salto de estación	Inyección de bus
Base/Incrementada	Lazo abierto	LA	-	-	-
Base	Control Predictivo Híbrido	HPC (2 Est)	X	X	-
	Control Experto Simple	CES (2 Est)	X	X	-
Incrementada	Control Predictivo Híbrido	HPC (3 Est)	X	X	X
	Control Predictivo Híbrido	HPC (2 Est)	X	X	-
	Control Experto Simple	CES (3 Est)	X	X	X
	Control Experto Simple	CES (2 Est)	X	X	-

Tabla 7.2. Escenarios de simulación para validar el diseño del controlador predictivo híbrido y experto simple.

El caso (LA) corresponde a la operación del sistema de transporte sin estrategia de control ó en lazo abierto, tanto para demanda base como demanda incrementada. Los casos restantes se definen por la combinación de los tipos de controladores, experto simple (CES) ó predictivo híbrido (HCP), con las estrategias de retención, salto de estación e inyección de buses en ciclo corto, aplicadas como acciones de control sobre el sistema de transporte público, para cada tipo de demanda, base (Base) o incrementada (Inc).

La modelación del controlador experto y del predictivo híbrido se desarrolló en los capítulos 4 y 5; ahora en este capítulo son validados en el microsimulador PARAMICS con la ayuda de la herramienta MISTRANSIT CON ESTRATEGIAS que fue programada y que incorpora la operación de los controladores sobre el sistema de transporte público, tal como se describió en el capítulo 6.

Los experimentos de validación presentan una componente variable que es la demanda de los usuarios en paradero, esto provoca que el sistema presente dos condiciones de operación; una normal con demanda base y otra con nivel de servicio irregular y deficiente por la presencia de la demanda incrementada. Las características de la demanda de los usuarios se muestran a continuación.

### 7.2.1 Demanda de usuarios en el sistema de transporte público

La demanda de usuarios utilizada para los experimento puede ser demanda base ó demanda incrementada; éstas se representan a través de la matriz OD que constan en las Tabla 7.3 y 7.4 respectivamente.

La demanda que se presenta en tablas corresponde a los usuarios que llegan a los paraderos diferidos a lo largo del corredor de buses en el sentido de ida (PO) y retornan en el sentido contrario (OP). Adicionalmente, está demanda está agregada por paraderos diferidos más próximos (paradero par + paradero impar). Las matrices utilizadas en los experimentos de simulación fueron creadas con fines académicos. La matriz de viajes de demanda incrementada y base fue extraída de los experimentos propuestos en Romero (2008). La matriz de demanda base fue reducida quedando en un tamaño 10 veces menor en promedio a la demanda incrementada. En aquellos sectores de demanda *peak* la reducción fue del orden de 20 veces menor mientras que en el resto de la matriz la reducción fue de la mitad. La matriz base tiene el orden de magnitud de la demanda promedio en paradero de la matriz propuesta para el Eje Pajaritos en uno de los experimentos propuesto por Tirachini (2010).

La demanda de usuarios en cada simulación es generada en forma aleatoria por MISTRANSIT considerando la matriz de viajes OD específica, donde cada usuario representa un viaje. La cantidad de usuarios en el sistema varía en cada simulación porque algunos no logran ingresar al sistema en el tiempo de simulación establecido. Las características por tipo de demanda se muestran a continuación.

### **Demanda base**

La demanda base que se presenta en la matriz de viajes representa la cantidad de usuarios que se observaría en los paraderos diferidos (paradero par + paradero impar) a lo largo del corredor de buses cuando el sistema de transporte opera en condición regular. La Tabla 7.3 muestra el orden de magnitud de los viajes entre pares origen – destino para los paraderos diferidos (par+impar).

O/D	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	-	3	4	5	7	3	2	9	21	2	1
2	2	-	4	4	6	2	2	8	18	2	1
3	20	1	-	7	9	3	4	12	28	3	2
4	10	2	1	-	12	5	5	17	39	4	2
5	9	9	2	1	-	4	4	13	31	34	18
6	4	5	6	2	6	-	0	7	16	17	9
7	4	4	6	3	6	0	-	7	16	17	9
8	10	7	12	20	36	1	2	-	27	28	15
9	11	8	8	20	25	5	5	3	-	26	14
10	2	9	10	15	24	3	4	10	1	-	3
11	1	18	11	17	18	4	3	7	3	2	-

Tabla 7.3. Matriz OD para demanda base

De forma gráfica, la demanda se representa por el perfil de carga por tramo en la Figura 7.4. El perfil de carga corresponde al volumen por tramo que se utiliza para el diseño de operación de flota y está expresado como el volumen del tramo anterior más el volumen del paradero actual menos el volumen de pasajeros que descienden en el paradero.

Para el sentido poniente-oriente se reconocen 11 paraderos diferidos y un par de paraderos ficticios, por el cual los buses salen y entran al sistema. Es importante recordar que los paraderos diferidos son diferenciados en par e impar porque estos son servidos por diferentes líneas de buses.

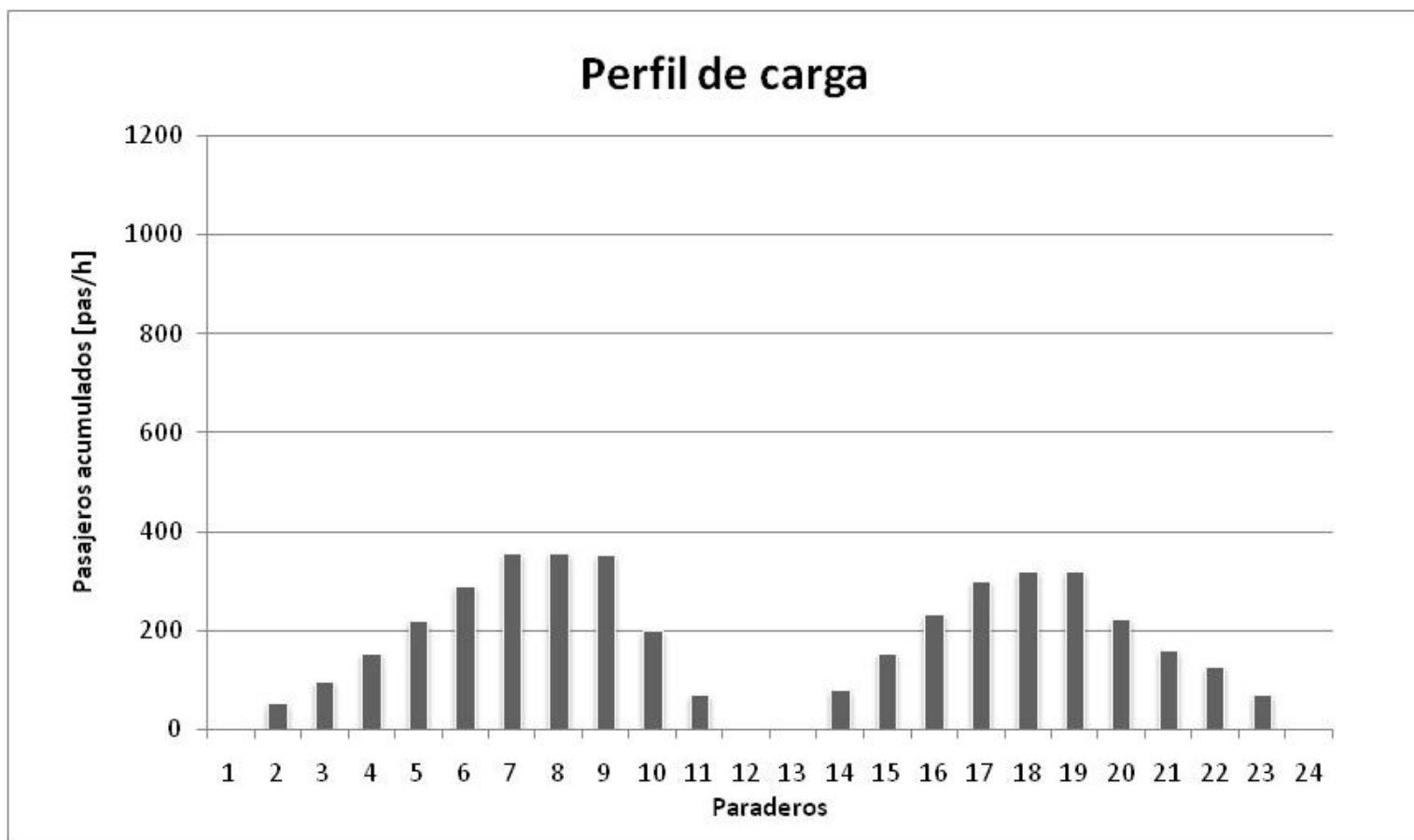


Figura 7.4. Perfil de carga por paraderos diferidos en el corredor de buses, con demanda base.

### Demanda incrementada

La demanda incrementada de usuarios es usual en eventos intempestivos y masivos que concentran muchos usuarios en paradero y que provoca mayores tiempos de espera al contar con un tamaño de flota insuficiente. En la Tabla 7.4 se presenta la matriz de viajes origen-destino por paraderos diferido a lo largo del corredor de buses.

O/D	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	-	5	8	8	13	5	5	17	41	4	2
2	7	-	7	8	11	4	4	15	35	4	2
3	40	1	-	13	17	7	7	23	55	6	3
4	20	3	1	-	24	10	10	33	77	8	4
5	17	18	3	2	-	75	75	265	624	67	35
6	8	9	12	3	12	-	0	134	315	34	18
7	8	9	12	3	12	0	-	134	315	34	18
8	20	13	23	40	72	3	3	-	529	56	30
9	21	15	16	40	494	10	10	6	-	52	28
10	3	18	19	29	484	67	67	19	2	-	5
11	1	35	22	34	348	66	66	130	5	3	-

Tabla 7.4. Matriz OD para demanda incrementada

La representación gráfica del perfil de carga tiene las mismas características que el caso de demanda base. El sentido de tráfico PO contiene los paraderos diferidos del 1 al 12 y en el sentido contrario OP contiene los paraderos 13 a 24, como muestra la Figura 7.5.



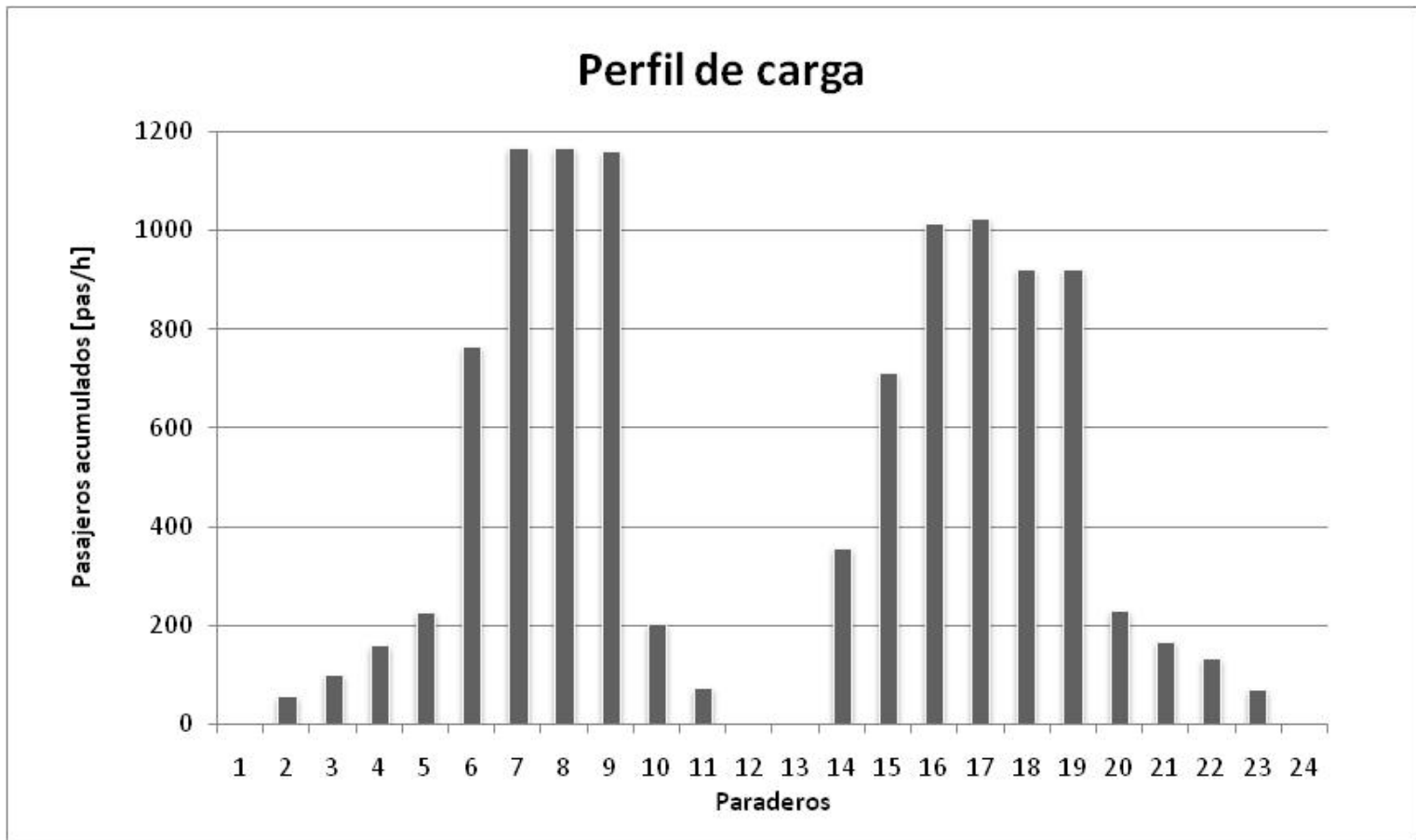


Figura 7.5. Perfil de carga por paraderos diferidos en el corredor de buses, con demanda incrementada.

### 7.2.2 Programación de flota

Los buses que operan en el corredor se agrupan en flotas, una opera en el corredor completo y la otra en el ciclo corto. La flota que opera en el corredor completo tiene 4 líneas de buses ó recorridos y la que opera en ciclo corto tiene dos líneas.

Cada línea de buses tiene una programación de operación de acuerdo al corredor que sirva. Se define entonces la frecuencia y tamaño de flota que satisfaga la demanda promedio de viajes que le corresponde a la línea de bus escogida. La frecuencia de diseño  $f_i^*$  es la cantidad de buses  $i$  en operación por unidad de tiempo y el tamaño de flota  $F_i^*$  corresponde a la cantidad de buses  $i$  que operan en el corredor. El bus genérico  $i$  puede ser, tipo  $a$  si opera el corredor completo ó  $b$  si opera en el ciclo corto. En la operación de buses, el intervalo de operación tiende a variar con respecto al intervalo de diseño que es el que se utiliza en el despacho de buses desde el terminal y corresponde al valor que se obtiene a partir de la demanda en el tramo más cargado.

Considerando que en el experimento se evalúan dos tipos de demanda, existirá una programación por cada una, una para demanda base y otra para demanda incrementada. La información de la programación es un parámetro de entrada de MISTRANSIT CON ESTRATEGIAS para el desarrollo de la simulación.

La programación de operación del sistema con demanda base incluye el intervalo y tamaño de flota para cada línea de bus. Así, se determina la programación representativa de una línea en corredor completo y una en ciclo corto.

El valor del intervalo se obtiene de su recíproco la frecuencia, y ésta de la relación entre la demanda máxima por tramo,  $\max \{V_i\}$  y el tamaño de embarque  $\bar{L}$ .

Con la frecuencia de diseño y el tiempo de ciclo,  $tc_a$  se establece el tamaño de flota necesario  $F_a^*$  para el recorrido de una línea de buses a lo largo del corredor completo; ver el capítulo 5, la ecuación (5.7). Las 4 líneas que operan el corredor completo necesitan cuatro veces el valor de flota establecido. La programación original se mantiene igual a la programación simulada por PARAMICS, para el caso de demanda base. La programación de operación para el caso de demanda base se presenta en Base\_sim/prog de la Tabla 7.4, que se utilizará en los experimentos simulados en el microsimulador PARAMICS con demanda base.

La programación con demanda incrementada se obtuvo del trabajo de Romero (2008), para el caso de operación de la estrategia en ciclo corto. La Tabla 7.4 contiene en este caso dos programaciones; Incrementada\_prog que corresponde a la programación propuesta en MISTRANSIT CON ESTRATEGIAS, mientras que Incrementada\_sim se refiere a la programación implementada en tiempo real.

En este caso las variables se asocian a la flota de buses tipo  $b$  porque el controlador determina el número de inyecciones que más tarde se ejecuta dentro de la herramienta de MISTRANSIT CON ESTRATEGIAS.

Demanda	$\max \{V_i\}$ [pas/h]	$H_a^*$ [s]	$H_b^*$ [s]	$f_a^*$ [bus/h]	$f_b^*$ [bus/h]	$F_a^*$ [bus]	$F_b^*$ [bus]	$tc_a$ [s]	$tc_b$ [s]	$\bar{L}$ [pas/bus]
Base_sim /prog	363	450	-	8	-	5	-	1920	-	45
Incrementada_prog	1167	270	86	13	42	8	15	1920	1290	45
Incrementada_sim	1167	270	Variable	13	Variable	8	Variable	1920	1290	45

Tabla 7.4. Resumen de programaciones para un línea de bus por tipo de demanda

Simbología:

$\max \{V_i\}$  = Volumen de pasajeros en el paradero  $i$  más cargado

$f_a^*$  = Frecuencia de diseño, bus  $a$

$f_b^*$  = Frecuencia de diseño, bus  $b$

$F_a^*$  = Tamaño de flota de buses  $a$

$F_b^*$  = Tamaño de flota de buses  $b$

$\bar{L}$  = Capacidad nominal del bus [pas / bus]

$tc_a$  = Tiempo de ciclo para buses  $a$  [s]

$tc_b$  = Tiempo de ciclo para buses  $b$  [s]

### 7.2.3 Características de la simulación

Cada experimento de simulación fue replicado 10 veces con los mismos parámetros de entrada de MISTRANSIT CON ESTRATEGIAS, pero con semillas aleatorias para transporte privado. Todos los experimentos utilizan la misma red de modelación que incluye la topología del corredor completo y del ciclo corto, así como los datos de entrada de MISTRANSIT CON ESTRATEGIAS, que contienen las características de operación de las flotas en el corredor completo y en el ciclo corto. El tiempo de simulación en PARAMICS es de una hora.

En el diseño de la estrategia de control predictivo híbrido se consideró un horizonte de predicción  $Np = 3$  para los escenarios con demanda base y demanda incrementada.

### 7.3 Calibración de ponderadores de la función objetivo

La función objetivo del controlador predictivo híbrido mostrada en la ecuación (5.30) es simplificada en la expresión (7.1).

$$\min \sum_{\ell=1}^{Np} \left[ \theta_1 \cdot c_1 \cdot \hat{H}_i(k+\ell) \hat{\Gamma}_p(k+\ell) + \theta_2 \cdot c_2 \cdot \left( \hat{H}_i(k+\ell) - H_i^* \right)^2 + \theta_3 \cdot c_3 \cdot \hat{L}_i(k+\ell) h_i(k+\ell-1) \right. \\ \left. + \theta_4 \cdot c_4 \cdot \hat{\Gamma}_p(k+\ell) \hat{H}_{i+1}(k+\ell+z_{i+1}) (1 - Su_i(k+\ell-1)) + \theta_5 \cdot c_5 \cdot F_b \right]_{\substack{i=i(k+\ell-1) \\ p=p(k+\ell-1)}} \quad (7.1)$$

Donde; el bus genérico  $i$  puede ser del tipo  $a$  que pertenece a la flota  $F_a$  ó del tipo  $b$  que pertenece a la flota  $F_b$ . El costo  $c$  está asociado al indicador de cada término. Así los costos  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$  y  $c_4$  están asociados al tiempo de espera mientras que el costo  $c_5$  se relaciona con el costo del operador.

Los ponderadores  $\theta$  tienen valores entre 0.1 y 1, excepto para el término asociado a la inyección de buses que utiliza ponderadores más altos. Al respecto, para comprobar si el efecto del número de inyecciones depende de la magnitud de su ponderador, se experimentó con valores de ponderador  $\theta_5$  menores a 100. Como resultado, se observa que un ponderador de magnitud alta incrementa la función objetivo y provoca que este crezca siendo imposible minimizarlo, como resultado la acción de inyección es nula. Mientras que un valor muy pequeño en el ponderador anula prácticamente el término. Por tanto, el efecto benéfico del ponderador  $\theta_5$  se logra de forma conjunta con el resto de ponderadores y con un valor entre cero y la unidad.

Para calibrar los ponderadores se pueden probar muchas combinaciones en los valores de los ponderadores de la función objetivo y esto demoraría mucho tiempo. En este trabajo, se estable un conjunto de casos iniciales a analizar, cada uno contiene valores específicos en los ponderadores de la función objetivo. El proceso de selección de los mejores ponderadores para la calibración se realizó mediante una heurística. La heurística permite escoger la mejor combinación de un par de casos evaluados; esta selección forma parte del siguiente para de casos analizados y este procedimiento constituye una iteración.

En cada iteración de selección se parte de la mejor combinación encontrada en la etapa anterior. De esta manera, se ahorra tiempo y los ponderadores seleccionados pertenecen a las mejores combinaciones. Para el proceso de calibración se escogió ponderadores del orden de 0.1, 1 y 10, éstos se agrupan en pares considerando objetivos similares como se explica a continuación.

Los ponderadores  $\theta_1$  y  $\theta_2$  se agrupan por su valoración del tiempo de espera que está asociado directamente con la regularidad de intervalos. Los ponderadores  $\theta_3$  y  $\theta_4$  consideran las estrategias contrapuestas de retención y salto de estación. Finalmente el ponderador  $\theta_5$  considera exclusivamente la acción de inyección de buses en ciclo corto.

La agrupación en pares permite emplear las mejores combinaciones obtenidas en la etapa previa. Así, del primer grupo de ponderadores se escoge el par que tiene menor tiempo de espera, sea promedio, total ó por retención. Para la selección del primer grupo de pares  $\theta_1$  y  $\theta_2$ , se considera los valores 0.1 y 1. La combinación que produce menor tiempo de espera por retención es para  $\theta_1=1$  y  $\theta_2=1$ . Estos ponderadores se mantienen fijos para la siguiente combinación  $\theta_3$  y  $\theta_4$ , que varían entre 0.1 y 1. De esta combinación,  $\theta_3=1$  y  $\theta_4=1$ , presentan el menor tiempo de espera promedio, así como también menor tiempo de espera por el primer bus y menor tiempo de espera por retención. Finalmente, se mantienen fijos los primeros 4 ponderadores evaluados y el último ponderador es el de inyección de buses que toma los valores de 10, 1 y 0.1. La Tabla 7.5 muestra los mejores casos obtenidos con la heurística y corresponde a aquellos que serán utilizados en la función objetivo del controlador HPC.

Caso	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$\theta_4$	$\theta_5$
A	1	1	0	0	1
B	0.1	0.1	0	0	1
C	1	1	0.1	0.1	1
D	1	1	1	1	1
E	1	1	1	1	10
F	1	1	1	1	0.1

Tabla 7.5. Ponderadores propuestos en la función objetivo para el controlador predictivo híbrido (HPC)

## 7.4 Parámetros de costos

Los costos que se consideran en la operación del sistema con estrategias de control son: el costo de los operadores y el costo de los usuarios. El primero corresponde al costo asociado a la operación de la flota de buses mientras que el segundo corresponde al tiempo de espera y el tiempo de viaje promedio de los usuarios dentro del sistema. El tiempo de acceso de los usuarios a paradero como costo de usuario no se considera en la formulación.

Para unificar las unidades de costos se emplea un factor de conversión, en el caso del costo de los usuarios se utiliza un ponderador del tiempo  $Pt$ . El valor  $Pt_{espera}$ , está asociado al tiempo de espera mientras que  $Pt_{viaje}$  está asociado al tiempo de viaje.

### Costo de los usuarios

El costo de los usuarios se expresa analíticamente en la siguiente ecuación.

$$C_{Us} = Pt_{espera} \cdot Te + Pt_{viaje} \cdot Tv \quad (7.2)$$

Donde;

$C_{Us}$  = Costo de los usuarios, [\\$]

$Pt_{espera}$  = Valor subjetivo del tiempo de espera, [\$/h]

$Pt_{viaje}$  = Valor subjetivo del tiempo de viaje, [\$/h]

$Te$  = Tiempo de espera total de los usuarios en el sistema, [h]

$Tv$  = Tiempo de viaje total de los usuarios en el sistema, [h]

Para el caso de los operadores se utiliza el factor de costo unitario  $c$ , definido como el costo de poner un vehículo más en el sistema, expresado por hora (base temporal) ó por kilómetro (base espacial).

### Costo de los operadores

El costo de los operadores está asociado a la inyección de buses en ciclo corto, por tanto se reporta tan solo en los resultados del controlador predictivo híbrido.

El costo del operador puede ser del tipo costo por kilómetro recorrido o por tiempo utilizado. En este caso, el costo por tiempo resulta más representativo porque las demoras adicionales por retención y salto se verán reflejadas en este costo. El costo de los operadores, considerando la base temporal, se muestra en la siguiente expresión:

$$C_{OP(h)} = \sum_{i=1}^{F_b} (c_{0(h)} + c_{1(h)} \cdot \bar{L}) \cdot Tv_b \quad b \in F_b \quad (7.3)$$

Donde;

$C_{OP(h)}$  : Costo total de los operadores con base temporal, [\\$]

$c_{0(h)}$  : Costo fijo de operación de un bus, [\$/veh-h]

$c_{1(h)}$  : Costo variable de operación de un bus, [\$/pas-h]

$\bar{L}$  : Capacidad nominal del bus, [pas]

$Tv_b$  : Tiempo de viaje del bus  $b$ , [h]

Los parámetros de costos asociados a los usuarios y operadores utilizados en los experimentos constan en la Tabla 7.6.

Parámetros	Valor	Unidad
$Pt_{espera}$	2700	[\$/h]
$Pt_{viaje}$	900	[\$/h]
$C_{0(h)}$	1800	[\$/veh-h]
$C_{1(h)}$	0.5	[\$/pas-h]

Tabla 7.6. Parámetros de costo para eje de la Av. Pajaritos  
Fuente: Tirachini (2007)

## 7.5 Reporte de resultados

En base a los reportes de salida, archivos \*.txt, entregados por el microsimulador PARAMICS al término de cada simulación, se crean las tablas y figuras. Las 10 réplicas que conforman un experimento se analizan con el fin de presentar un grupo homogéneo de resultados.

Para lo cual se utilizó el software computacional, MINITAB, que permite evaluar la muestra considerando parámetros escogidos, en este caso se escogió el tiempo de espera total y como segundo criterio el número de usuarios en el sistema. El objetivo de evaluar la muestra es eliminar aquellos registros que no son representativos, considerando la desviación estándar y la media. Aquellos valores lejos de la media son descartados como muestra la Figura 7.6. El criterio de eliminación también procura no afectar el tamaño muestral.

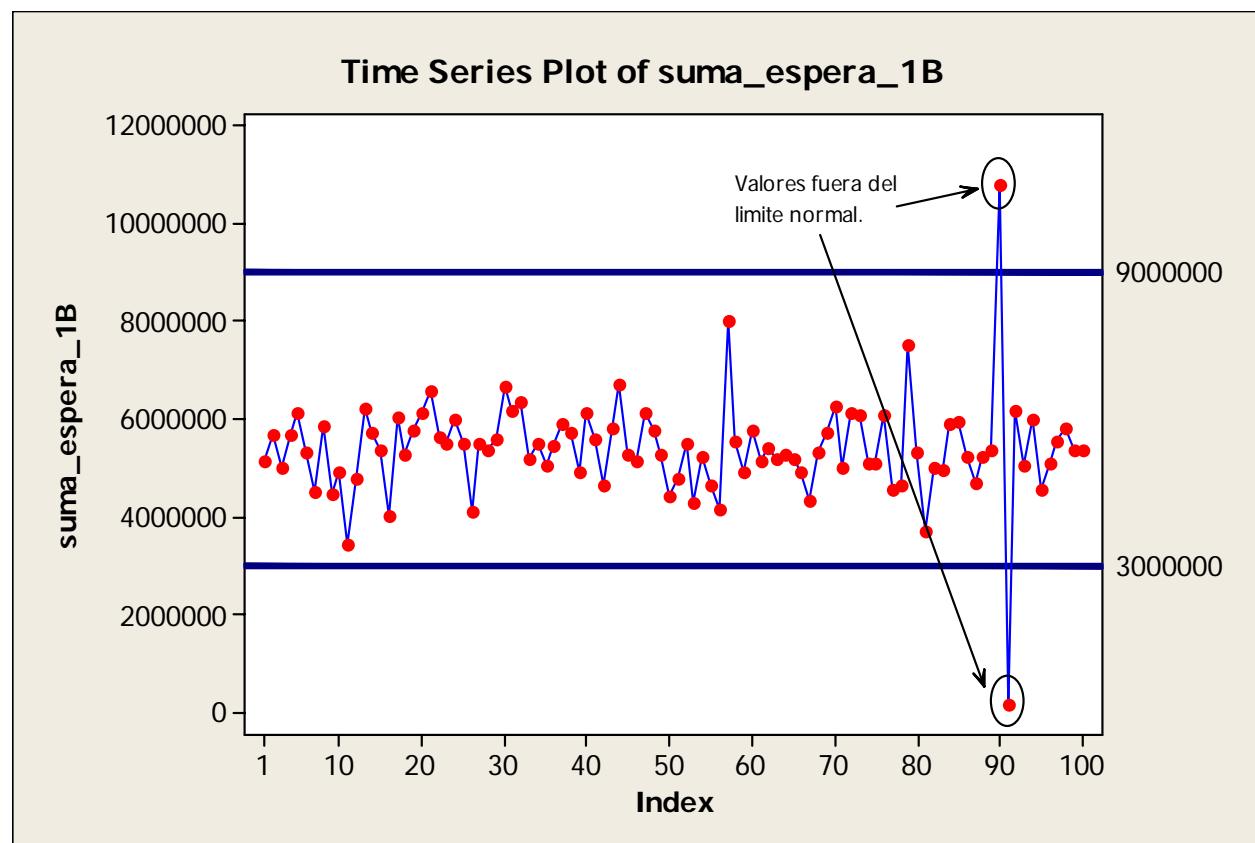


Figura 7.6. Reporte gráfico del software MINITAB que muestra valores anómalos

Los indicadores de desempeño que se consideran para medir el beneficio de la estrategia de control son: el tiempo de espera promedio en paradero, el tiempo de espera promedio por

retención, el costo de los usuarios promedio y el costo de los operadores promedio. También se reportan variables importantes, tales como el número de pasajeros en el sistema, número de retenciones realizadas, porcentaje de usuarios retenidos en paradero, porcentaje de usuarios saltados y tiempo de retención promedio por pasajero, entre otros.

Resulta difícil encontrar un patrón único de análisis de la operación del sistema de transporte, tomando en cuenta que existen variables que influyen, tales como la demanda y potenciales estrategias de transporte que se implementen. Es por esta razón que los resultados son analizados bajo diferentes condiciones de operación representados en los experimentos definidos en la Tabla 7.2. Los indicadores de cada caso experimental se compararán con el respectivo indicador en la situación en lazo abierto (LA).

Los resultados de los experimentos se agrupan por tipo de demanda, base e incrementada, como se muestra en la Tabla 7.2. En adelante se utilizará las abreviaturas: LA para referirse al sistema sin control o en lazo abierto, HPC para controlador predictivo híbrido y CES para controlador experto simple.

### 7.5.1 Tablas de resultados con demanda base

En la operación del sistema de transporte público con demanda base se consideran para los controladores sólo dos estrategias de control, la retención de bus en paradero y la de salto de estación. Los experimentos se agrupan en dos escenarios; el primero es el predictivo híbrido HPC con estrategia de retención y salto (HPC-2 Est) y el segundo es el controlador experto CES con estrategia de retención y salto de estación (CES-2 Est).

#### 7.5.1.1 HPC con estrategia de retención y salto de estación

Para este experimento se utilizan las combinaciones de ponderadores propuestas en la Tabla 7.5 con una modificación, en este caso, el ponderador de inyección  $\theta_5 = 0$  en todos los casos, porque la estrategia de inyección no está activa. En la Tabla 7.7 se presenta los indicadores analizados que corresponden a los valores promedio de 10 réplicas cada uno.

Caso	$\theta_1$ - $\theta_2$ - $\theta_3$ - $\theta_4$ - $\theta_5$	Us.	Te_par min/pas	Te_1bus min/pas	Te_ret_u min/pas	Te_ret min/pas	Ph %	C_Us \$/us.	Tv min/us	Ah_Te %	Te_total min/pas	T_total min/pas
LA	-	1983	14.47	10.25	0	0	0	728	5.11	-	14.47	19.57
1	1-1-1-1-0	1982	14.37	10.18	0.32	0.018	5	724	5.20	0.7	14.38	19.58
2	0.1-0.1-0-0-0	1967	14.38	10.26	1.41	0.185	11	726	5.23	0.6	14.57	19.80
3	1-1-0-0-0	1961	13.94	9.72	1.17	0.133	12	705	5.18	3.6	14.07	19.25
4	1-1-0.1-0.1-0	1952	13.49	9.51	1.22	0.154	12	685	5.18	6.7	13.64	18.82

Tabla 7.7. Indicadores con HPC con estrategia de retención y salto de estación para demanda base

Se presenta a continuación la nomenclatura de indicadores y parámetros relevantes que se obtienen de los experimentos.

$\theta_i$  : Ponderador del término  $i$  de la función objetivo.

Us. : Número de usuarios en el sistema durante la simulación.

Te_par	:Tiempo de espera promedio en paradero, expresado mediante la relación del tiempo de espera total en paradero respecto del número de usuarios.
Te_1bus	:Tiempo de espera promedio por el primer bus.
Te_total	:Tiempo de espera promedio definido como la sumatoria de los tiempos de espera en paradero y el tiempo de retención en bus (Te_ret).
T_total	:Tiempo total promedio definido como la sumatoria de los tiempos de espera en paradero, tiempo de retención en bus y tiempo de viaje.
Te_ret_u	:Tiempo de espera promedio por retención por usuario retenido, expresado por la relación entre el tiempo de retención total y el total de usuarios retenidos.
Te_ret	:Tiempo de retención promedio del sistema, expresado por la relación entre el tiempo de retención total y el total de usuarios en el sistema.
Ph	:Porcentaje de pasajeros retenidos respecto del total de usuarios.
Su	:Porcentaje de pasajeros saltados por efecto de la estrategia de salto de estación.
C_Op_Iny	:Costo del operador asociado a la inyección de buses en ciclo corto.
C_Us	:Costo de los usuarios promedio por usuario, expresado por la relación entre el costo total de los usuarios y el número de usuarios.
Tv	:Tiempo de viaje promedio de los usuarios.
Iny_A	:Buses inyectados en el sistema que pertenecen a la flota $F_a$ .
Iny_B	:Buses inyectados en el sistema que pertenece a la flota $F_b$ .
Ah_Te	:Ahorro promedio en tiempo de espera en paradero respecto a la situación en lazo abierto.

Los casos 1 al 4 corresponden a experimentos con estrategias de retención y salto, donde los ponderadores  $\theta_1$  a  $\theta_4$  están activos, no así el ponderador de inyección  $\theta_5$  que permanece nulo.

Al analizar los indicadores, tiempo de espera Te\_par y tiempo de retención promedio Te\_ret, se observa el efecto de los ponderadores  $\theta_3$  y  $\theta_4$  asociados a la estrategia de retención y salto respectivamente sobre los indicadores.

En el caso 1, los ponderadores  $\theta_3 = \theta_4 = 1$  representan mayor importancia a los términos asociados a la retención y salto de estación, por tanto el número de retenciones se ve restringido



y las acciones de control tienden a ser mínimas. Esto se refleja en un bajo porcentaje de pasajeros retenidos,  $Ph = 5\%$ , en el tiempo de retención por persona ( $Te_{ret}$ ) del orden de 0.018 [min/pas] y en el tiempo de espera en paradero ( $Te_{par}$ ) del orden de 14 [min/pas].

Por el contrario en el caso 4, el ponderador  $\theta_3 = \theta_4 = 0.1$  propone un mayor número de retenciones, del orden de  $Ph=12\%$  que provoca mayor tiempo de retención por pasajero ( $Te_{ret}$ ) del orden de 0.154 [min/pas]. Para los casos 2 y 3, la flexibilidad en la aplicación de las estrategias de retención y salto traducida en los ponderadores,  $\theta_3$  y  $\theta_4$  igual a cero producen mayores retenciones con tiempos de retención ( $Te_{ret}$ ) del orden del 0.15 [min/pas] en promedio para los casos 2 y 3 que representan un porcentaje de usuarios retenidos ( $Ph$ ) del orden de 12 %.

Con los ponderadores  $\theta_1$  y  $\theta_2$  igual a la unidad del caso 3 y caso 4, se producen los menores tiempos de espera: promedio, primer bus y de retención por pasajero. Estos resultados tienen sentido si se toma en cuenta que la importancia del ponderador se refleja en su magnitud, el valor unitario representa mayor importancia y esto provoca que el objetivo de cada término asociado al ponderador se cumpla específicamente, es decir el de minimización del tiempo de espera (término 1) y el de regularidad de intervalos (término 2).

Entre todos los casos presentados, la combinación de ponderadores del caso 4 presenta el menor tiempo de espera promedio por pasajero,  $Te_{par} = 13.49$  [min/pas], que representa un ahorro ( $Ah_{Te}$ ) de 6.7% para los usuarios por efecto de la estrategia de retención y salto.

### 7.5.1.2 CES con estrategia de retención y salto de estación

El controlador experto simple (CES) emplea exclusivamente las estrategias de retención y salto de estación y genera dos casos experimentales: en lazo abierto (LA) y con estrategias de control, CES (2 Est).

En la Tabla 7.8 se ve que la reducción en el tiempo de espera promedio ( $Te_{par}$ ) es del orden de 30 seg., esto pese a que existen pasajeros que son retenidos por efecto de la estrategia de retención un tiempo ( $Te_{ret\_u}$ ) aproximado de un minuto. Finalmente, el ahorro en tiempo de espera ( $Ah_{Te}$ ) reportado por las estrategias de retención y salto para el controlador experto es del orden de 2.6%.

Caso	Us.	$Te_{par}$ min/pas	$Te_{1bus}$ min/pas	$Te_{ret\_u}$ min/pas	$Te_{ret}$ min/pas	Ph %	C_Us \$/us.	Tv min/us	Iny_A bus	Ah_Te %	$Te_{total}$ min/pas	T_total min/pas
LA	1983	14.47	10.25	0	0	0	728	5.11	32	-	14.47	19.57
CES (2 Est)	1956	14.09	9.89	1.07	0.149	14	716	5.47	32	2.60	14.24	19.71

Tabla 7.8. Indicadores con CES con estrategias de retención y salto de estación para demanda base

### 7.5.1.3 Tabla resumen y gráfico

La Tabla 7.9 muestra los indicadores considerados para la mejor alternativa del controlador predictivo híbrido (HPC) y para el caso único del controlador experto simple (CES). En ambos

casos se emplea la estrategia de retención y salto de estación en comparación con la condición en lazo abierto (LA).

Caso	θ1- θ2- θ3- θ4- θ5	Us.	Te_par min/pas	Te_1bus min/pas	Te_ret_u min/pas	Te_ret min/pas	Ph %	C_Us \$/us.	Tv min/us.	Ah_Te %	Te_total min/pas	T_total min/pas
LA	-	1983	14.47	10.25	0	0	0	728	5.11	-	14.47	19.57
HPC (2 Est)	1-1-0.1-0.1-0	1952	13.49	9.51	1.22	0.154	12	685	5.18	6.75	13.64	18.82
CES (2 Est)	-	1956	14.09	9.89	1.07	0.149	14	716	5.47	2.60	14.24	19.71

Tabla 7.9. Indicadores por tipo de controlador para demanda base

El mejor caso del controlador predictivo híbrido, HPC (2 Est), causa un ahorro en tiempo de espera  $Ah\_Te=6.75\%$ , lo que es casi el doble del ahorro del controlador experto simple,  $Ah\_Te=2.60\%$ . El número de retenciones efectuadas (Ph) así como el tiempo de retención ( $Te\_ret$ ) es similar en los casos HPC y CES con 2 estrategias, salto y retención.

El controlador predictivo (HPC) logra acciones de control en igual número que el experto simple, sin embargo la magnitud de las retenciones son tales que el ahorro que se logra es más significativo que el experto simple por el análisis global del sistema involucrado en el modelo predictivo del HPC. Esto queda representado claramente en la Figura 7.7 donde el tiempo de retención ( $Te\_ret$ ) es de similar magnitud no así el tiempo de espera promedio ( $Te\_par$ ) que se logra con la aplicación de los controladores en cada caso.

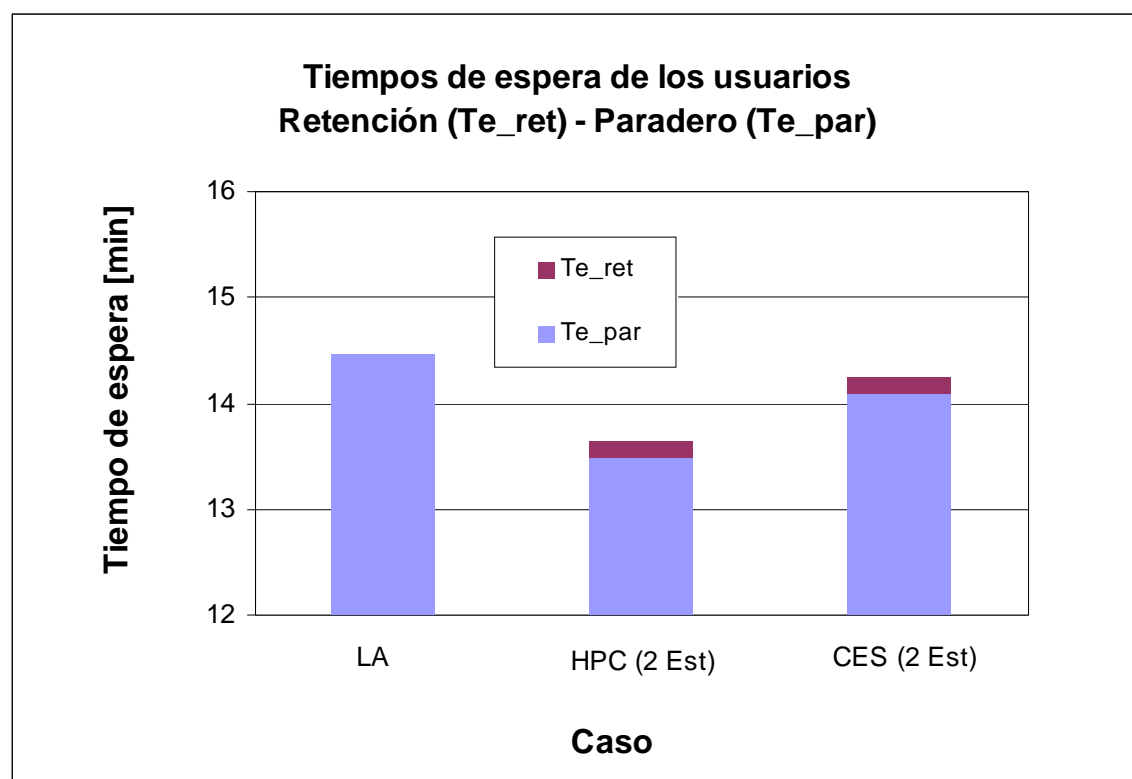


Figura 7.7 Tiempo de espera de los usuarios, demanda base

## 7.5.2 Tablas de resultados con demanda incrementada

En la operación del sistema con demanda incrementada se consideran las tres estrategias de control, retención de bus en paradero, salto de estación e inyección de buses en ciclo corto; todas ellas como acciones de control, tanto del controlador experto simple (CES) como del predictivo híbrido (HPC). Los experimentos se agrupan en cuatro casos posibles; el primero con el controlador predictivo híbrido con estrategia de retención, salto e inyección de buses (HPC\_3 Est), el segundo con el controlador predictivo híbrido con estrategia de retención y

salto (HPC\_2 Est), el tercero con el controlador experto simple con estrategia de retención, salto e inyección (CES\_3 Est) y el cuarto con el controlador experto simple con estrategia de retención y salto de estación (CES\_2 Est).

### 7.5.2.1 HPC con estrategia de retención, salto e inyección de buses

Los experimentos con el controlador predictivo híbrido (HPC) utilizan los ponderadores de la función objetivo que fueron escogidos en la etapa de calibración de la sección 7.3 como muestra la Tabla 7.10. Los indicadores que se presentan en la Tabla 7.10 corresponden a los valores promedio del conjunto de réplicas realizadas para cada caso.

HPC (3Est)	$\theta_1$ - $\theta_2$ - $\theta_3$ - $\theta_4$ - $\theta_5$	Us.	Te_par min/pas	Te_1bus min/pas	Te_ret_u min/pas	Te_ret min/pas	Ph %	Iny_B bus	C_Op_Iny \$/bus	C_Us \$/us.	Tv min/us	Ah_Te %	Te_total min/pas	T_total min/pas
LA	-	5742	16.07	7.67	0	0	0	0	0	763	2.63	-	16.07	18.70
1	1-1-0-0-1	5662	14.89	7.56	26.85	0.423	1.5	2	928	712	2.77	7.33	15.31	18.09
2	0.1-0.1-0-0-1	5592	14.86	7.82	31.51	0.709	1.4	1	425	711	2.74	7.51	15.57	18.31
3	1-1-0.1-0.1-1	5605	15.22	7.94	24.43	0.269	1.1	2	1037	728	2.80	5.31	15.48	18.29
4	1-1-1-1-1	5520	13.94	7.31	11.73	0.074	0.6	3	1420	671	2.83	13.26	14.01	16.85
5	1-1-1-1-10	5575	13.88	7.47	16.15	0.127	0.7	2	1153	667	2.81	13.62	14.01	16.82
6	1-1-1-1-0.1	5560	13.79	6.79	17.41	0.214	0.9	2	910	663	2.81	14.18	14.00	16.81

Tabla 7.10. Indicadores del HPC con estrategias de retención, salto e inyección, para demanda incrementada\*

\* La acción de salto de estación no fue propuesta en ningún caso por el controlador HPC, porque si bien el salto de estación es una alternativa factible, el controlador finalmente anulará la acción propuesta si existe por lo menos un usuario que descienda en el paradero de control. Las características de la demanda incrementada es tal que existirá por lo menos un usuario que descienda en algún paradero y por esta razón el porcentaje  $S_u=0$  y no se incluye en la Tabla 7.10. Los resultados obtenidos se analizan por pares de casos en forma descendente y se destaca las siguientes observaciones.

Cuando los ponderadores  $\theta_1$  y  $\theta_2$  son cercanos a cero, tienen menor grado de importancia dentro de la función objetivo y por tanto existe más flexibilidad en la aplicación de la acción de control asociada al ponderador. En este caso, la combinación de ponderadores  $\theta_1 = \theta_2 = 0.1$  produce mayores retenciones que se traducen en mayor tiempo de retención ( $Te_{ret}$ ) y mayor porcentaje de pasajeros retenidos (Ph). Si bien resulta una alternativa atractiva para regularizar intervalos y disminuir el tiempo de espera promedio de los pasajeros en paradero, también afectará a los usuarios que se quedan esperando en paradero y cabe mencionar que la demanda analizada supera los umbrales normales de operatividad, por tanto resulta prudente escoger la combinación  $\theta_1 = \theta_2 = 1$  para no perjudicar a los usuarios con retenciones excesivas. Al mantener fijos  $\theta_1$  y  $\theta_2$  y analizar los ponderadores  $\theta_3$  y  $\theta_4$ , se observa que las menores retenciones se producen también para las combinaciones  $\theta_3 = \theta_4 = 1$ , con una ventaja adicional, la magnitud del tiempo de retención y porcentaje de pasajeros retenidos disminuye ligeramente porque se trata de los ponderadores asociados a estas acciones de control.

Si bien la magnitud del ponderador asociado a la inyección varía entre rangos mayores a los de las estrategias de retención y salto, los resultados obtenidos demuestran que la magnitud de este

ponderador afecta poco a la función objetivo, pero si el horizonte de predicción  $Np$ . Mientras mayor sea el horizonte de predicción, más buses inyectados podrán ser vistos en el modelo predictivo y será notoria la disminución del tiempo de espera en paradero y también se logrará minimizar la función objetivo del controlador y consecuentemente la inyección será una acción de control factible en cada evento en terminal  $k'$ .

El número de buses inyectados (Iny\_B) está en el orden de 3 [bus/h], para el mejor caso (caso 4). Esto significa que en el transcurso de una hora fue factible realizar tres inyecciones propuestas por el controlador predictivo a un costo de 1420 [\$] por bus inyectado; que luego fueron ejecutadas por el microsimulador, dado que existía la ventana de tiempo necesaria para la inyección. Cabe mencionar, que el diseño de la estrategia de control considera también el costo de operación asociado a cada bus inyectado, que se traduce en un término que también tiene que ser minimizado en la función objetivo.

Entre todos los casos propuestos, la mejor combinación de ponderadores corresponde al caso 6 que tiene todos los ponderadores igual a la unidad, excepto  $\theta_5 = 0.1$ . El beneficio de esta alternativa radica en el equilibrio entre el número de retenciones y el número de inyecciones de buses que operan en ciclo corto. De esta manera que se logra reducir el tiempo de espera total de los usuarios en paradero sin incrementar excesivamente el tamaño de flota en operación. El ahorro de tiempo de espera (Ah\_Te) logrado con el diseño de la estrategia de control es del orden del 15%. La inyección de buses logra que los usuarios en paradero esperen por el primer bus (Te\_1bus) un minuto menos con la implementación del HPC con las tres estrategias activas.

Finalmente, si se compara el caso 6, donde el costo del operador por las inyecciones realizadas ( $C_{Op\_Iny} = 910$  \$/bus) frente al costo del usuario promedio ( $C_{Us} = 663$  \$/us), se observa que el costo asociado a la estrategia de inyección resulta ligeramente superior al costo de un usuario beneficiado. Sin embargo, dado la cantidad de inyecciones promedio realizadas, del orden de 2 [bus/h], en comparación con el beneficio global de los 5500 usuarios en promedio en el sistema; se puede observar claramente que el beneficio global es mayor.

### 7.5.2.2 HPC con estrategia de retención y salto de estación

El controlador predictivo con estrategias de retención y salto opera con el parámetro de inyección inactivo en los datos de entrada de MISTRANSIT CON ESTRATEGIAS. Por tanto el ponderador  $\theta_5$  de inyección se anula en la función objetivo para representar exclusivamente el efecto de las estrategias de retención y salto. La Tabla 7.11 muestra los resultados obtenidos con el controlador predictivo con las estrategias mencionadas.

HPC (2 Est)	$\theta_1$ - $\theta_2$ - $\theta_3$ - $\theta_4$ - $\theta_5$	Us.	Te_par min/pas	Te_1bus min/pas	Te_ret_u min/pas	Te_ret min/pas	Ph %	C_Us \$/us.	Tv min/us	Ah_Te %	Te_total min/pas	T_total min/pas
LA	-	5742	16.07	7.67	-	-	-	763	2.63	-	16.07	18.70
1	0.1-0.1-0-0-0	5618	15.65	7.30	33.04	0.581	1.3	744	2.69	2.63	16.23	18.91
2	1-1-0-0-0	5681	15.99	7.37	32.57	0.423	1.1	760	2.67	0.50	16.41	19.08
3	1-1-1-1-0	5596	15.88	7.80	14.89	0.094	0.4	755	2.67	1.18	15.97	18.64
4	1-1-0.1-0.1-0	5664	15.80	7.82	27.26	0.365	1.1	751	2.66	1.69	16.16	18.82

Tabla 7.11. Indicadores del HPC con estrategia de retención y salto de estación para demanda incrementada

Entre los cuatro casos propuestos, los mejores resultados en cuanto a tiempo de espera promedio ( $Te_{par}$ ) y tiempo de retención ( $Te_{ret}$ ) es para el caso 3, con un ahorro de tiempo de espera ( $Ah_{Te}$ ) del orden de 1.2%, un tiempo de retención ( $Te_{ret}$ ) de 0.09 [min/pas] y un porcentaje casi nulo de pasajeros afectados por la estrategia de retención ( $Ph$ ).

De forma general, las estrategias de retención y salto por si solas no presentan significativas reducciones del tiempo de espera promedio, por cuanto la demora en el tiempo de espera de mayor impacto se relaciona con los usuarios que arribaron intempestivamente a paradero aumentando de esta manera el tiempo de espera promedio en paradero.

### 7.5.2.3 CES con estrategia de retención, salto e inyección de buses

La Tabla 7.12 muestra los dos casos experimentados, en lazo abierto (LA) y con estrategia de retención, salto de estación e inyección de bus (CES\_3 Est); para cada caso se presenta los indicadores asociados.

Caso	Us.	$Te_{par}$ min/pas	$Te_{1bus}$ min/pas	$Te_{ret_u}$ min/pas	$Te_{ret}$ min/pas	Ph %	Iny_B bus	C_Op_Iny \$/bus	C_Us \$/us.	Tv min/us	Ah_Te %	$Te_{total}$ min/pas	T_total min/pas
LA	5742	16.07	7.67	0	0	0	0	-	763	2.63	-	-	18.70
CES (3 Est)	5548	13.40	7.18	0.80	0.237	29.9	8	4169	664	4.10	16.63	13.63	17.73

Tabla 7.12. Indicadores del CES con estrategias de retención, salto e inyección de buses, demanda incrementada \*

\* La acción de salto de estación no fue propuesta en ningún caso por el controlador CES, porque si bien la base de reglas propone el salto de estación, el controlador es capaz de anular la acción cuando exista algún usuario que descienda en dicho paradero. Las características de la demanda incrementada es tal que existirá por lo menos un usuario que descienda en algún paradero. Por esta razón, el porcentaje  $Su=0$  y no se incluye en la Tabla 7.12.

El controlador experto con las tres estrategias de control tiene una reducción del tiempo de espera en paradero ( $Te_{par}$ ) del orden de 3 minutos por pasajero y un aumento por retención no mayor a 0.24 [min/pas] por usuario promedio. Se puede apreciar que el número de retenciones aplicadas es considerable,  $Ph=30\%$ .

La estrategia de inyección marca una gran diferencia porque logra inyectar al sistema 8 buses que operan en el ciclo corto con un aumento considerable del costo de los operadores. El monto por cada inyección realizada del orden de 4169 [\$/bus] Claramente, los usuarios tienen mayor beneficio en conjunto pero a costa de un incremento del costo del operador, situación que el diseño del controlador experto simple no considera.

### 7.5.2.4 CES con estrategia de retención y salto de estación

En la Tabla 7.13, se observa que el tiempo de espera promedio en paradero ( $Te_{par}$ ) por efecto del controlador aumenta inesperadamente por efecto de la aplicación de las estrategias de retención y salto.

Caso	Us.	Te_par min/pas	Te_1bus min/pas	Te_ret_u min/pas	Te_ret min/pas	Ph %	C_Us \$/us.	Tv min/us.	Ah_Te %	Te_total min/pas	T_total min/pas
LA	5742	16.07	7.67	0	0	0	763	2.63	-	16.07	18.70
CES (2 Est)	5666	16.21	6.97	0.83	0.254	30.7	779	3.27	-0.89	16.47	19.73

Tabla 7.13. Indicadores del CES con estrategia de retención y salto de estación para demanda incrementada

El efecto de la retención de bus en paradero resultó perjudicial en este caso, porque la demanda es muy alta y el ahorro de tiempo de espera por regularidad en intervalos logrado por el controlador experto, no logra superar el tiempo de retención adicional,  $Te_{ret} = 0.25$  [min/pas]. De esta manera, se produce una pérdida del orden de 0.89% en el tiempo de espera en paradero total ( $Ah_{Te}$ ). Claramente, las acciones de control propuestas por el controlador experto simple no consideraron el efecto de la demanda sobre la operación del sistema. Esta particularidad del experimento se puede atribuir a un comportamiento no previsto del controlador, lo que evidencia una limitación del controlador. Específicamente, se debiera incorporar una restricción que anule las acciones de control en caso que empeoren la situación actual del sistema.

### 7.5.2.5 Tabla resumen y gráfico

La Tabla 7.14 resume los experimentos con mejores resultados para el caso de los controladores experto simple y predictivo híbrido con las tres estrategias de control y con dos estrategias en comparación con el sistema en lazo abierto (LA), para el escenario con demanda incrementada.

Caso	01- 02- 03- 04-05	Us.	Te_par min/pas	Te_1bus min/pas	Te_ret_u min/pas	Te_ret min/pas	Ph %	Iny_B bus	C_Op_Iny \$/bus
LA	-	5742	16.07	7.67	0	0	0	0	-
HPC (3 Est)	1-1-1-1-0.1	5560	13.79	6.79	17.41	0.214	0.9	2	910
HPC (2 Est)	1-1-1-1-0	5596	15.88	7.80	14.89	0.094	0.4	0	-
CES (3 Est)	-	5548	13.40	7.18	0.80	0.237	29.9	8	4169
CES (2 Est)	-	5666	16.21	6.97	0.83	0.254	30.7	0	-

Tabla 7.14. Indicadores por tipo de controlador para demanda incrementada \*

Caso	01- 02- 03- 04-05	Us.	C_Us \$/us.	Tv min/us.	Ah_Te %	Te_total min/pas	T_total min/pas
LA	-	5742	763	2.63	-	16.07	18.70
HPC (3 Est)	1-1-1-1-0.1	5560	663	2.81	14.18	14.00	16.81
HPC (2 Est)	1-1-1-1-0	5596	755	2.67	1.18	15.97	18.64
CES (3 Est)	-	5548	664	4.10	16.63	13.63	17.73
CES (2 Est)	-	5666	779	3.27	-0.89	16.47	19.73

Tabla 7.14.- Indicadores por tipo de controlador para demanda incrementada \* (Continuación)

Al comparar el controlador experto simple (CES) con el predictivo híbrido (HPC) con las tres estrategias (retención, salto e inyección), se puede observar que el mayor ahorro de tiempo de espera en paradero es para el experto simple con  $Ah_{Te} = 16.63\%$ , ligeramente superior al predictivo híbrido  $Ah_{Te} = 14.18\%$ . Sin embargo, no resulta suficientemente beneficioso, porque el número de retenciones es alto al igual que el número de inyecciones ( $Iny_B = 8$ ).

Esto indica que el controlador experto basado en reglas entrega acciones de control sin un análisis a futuro del efecto de las acciones tomadas. Por el contrario, el controlador predictivo

híbrido logra un ahorro de tiempo de espera similar al experto, pero con notable diferencia en cuanto al número de retenciones efectuadas. Existen menos usuarios afectados con la retención en el caso del predictivo híbrido HPC(3\_Est) donde  $Ph=1\%$  en comparación con el experto simple CES(3\_Est) donde  $Ph=30\%$ . Esto provoca que el tiempo de espera por retención ( $Te_{ret}$ ) sea menor con el predictivo híbrido, inclusive el tiempo de espera del primer bus en paradero ( $Te_{1bus}$ ) es menor al propuesto por el experto simple. El número de inyecciones con el controlador predictivo híbrido es menor, más acorde a un análisis global y predictivo del sistema, con un costo adicional razonable por efecto de inyección para los operadores.

La Figura 7.10 muestra la comparación entre los tiempos de espera total por efecto de la retención ( $Te_{ret}$ ) y el tiempo de espera promedio en paradero ( $Te_{par}$ ), cuando se aplican las estrategias de control por tipo de controlador.

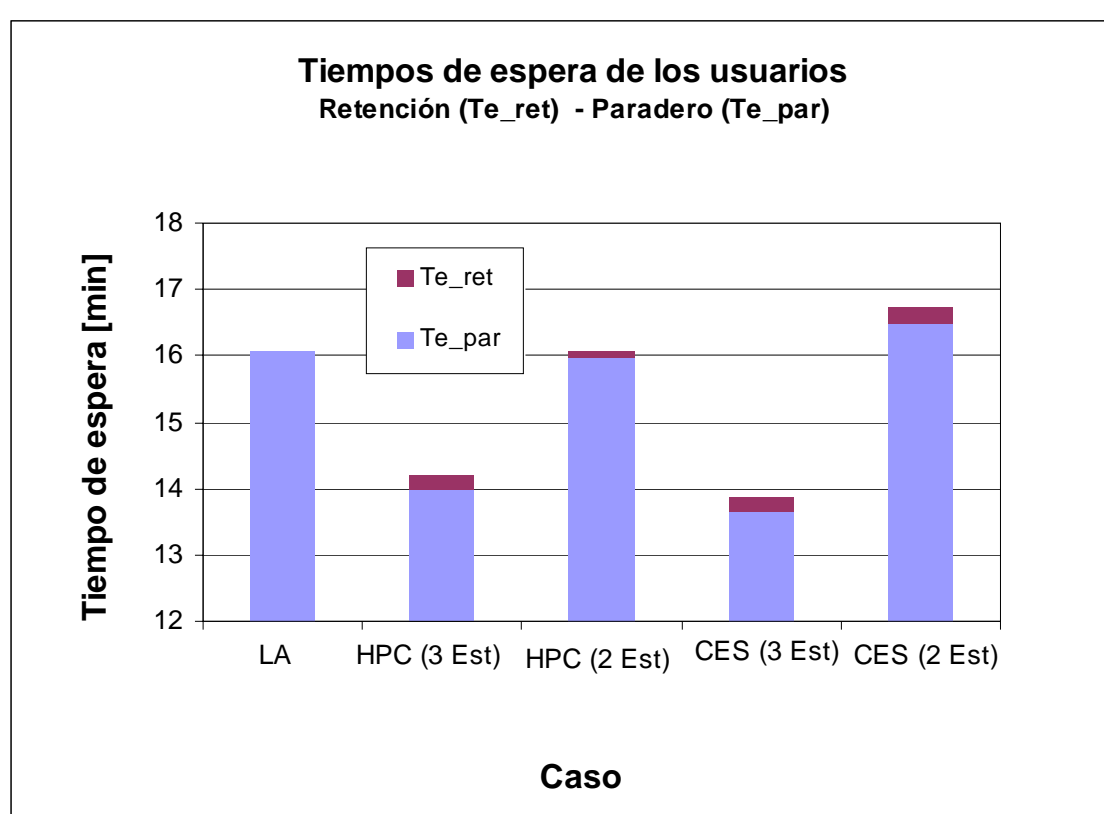


Figura 7.8 Tiempo de espera de los usuarios, demanda incrementada

Se puede observar que el controlador experto y el predictivo híbrido con las tres estrategias incorporadas, HPC (3\_Est) y CES (3\_Est), tienen los menores tiempos de espera promedio en paradero total ( $Te_{total}$ ), esto es previsible considerando que la demanda incrementada se ve aliviada principalmente por la estrategia de inyección de buses que está incluida.

El desempeño de los controladores con dos estrategias, salto y retención, difícilmente logran mejorar el tiempo de espera total, el predictivo híbrido logra mantener el nivel de servicio que se presentaba cuando el sistema opera en lazo abierto (LA).

## 7.6 Análisis de resultados

En los experimentos realizados se comprueba que la operación del sistema sin control (LA), tiene en su mayoría tiempos de espera mayores (ver los resúmenes en la Tabla 7.9 y Tabla 7.14). Adicionalmente, los casos con estrategia de control incluida tienen ahorro en los tiempos de espera en paradero ( $Ah_{Te}$ ).

Esto significa que la aplicación de una estrategia de control adecuada mejora la operación del sistema, independientemente del tipo de controlador que se aplique.

La estrategia de salto de estación en los experimentos fue prácticamente nula, porque la demanda escogida para el experimento considera que en su mayoría existe por lo menos un usuario que baja en algún paradero, por tanto la acción de control propuesta se anula.

Para el escenario con demanda base, se puede concluir que el diseño del controlador predictivo híbrido (HPC) produce mejores resultados que el control experto simple, porque las acciones de control propuestas (retención/salto) son evaluadas en un modelo predictivo cuando se trata del HPC y esto es una ventaja importante. Adicionalmente, el análisis global del sistema que realiza el HPC logra que las acciones de control implementadas minimicen notablemente el tiempo de espera de los usuarios. Por otro lado, la limitación del control experto simple radica en una evaluación sesgada del comportamiento del sistema, la irregularidad de intervalos en las proximidades del bus que genera el evento no garantiza que la acción de control tomada afecte de igual manera al resto del sistema, es decir si bien puede lograr regularizar los intervalos en las cercanías puede perjudicar los intervalos lejanos causando mayores tiempos de espera.

Para el escenario con demanda incrementada, se puede observar que el controlador predictivo híbrido (HPC) propone menos acciones de control de retención y menor número de inyecciones que el controlador experto (CES), que da como resultado un tiempo de espera promedio y un tiempo de espera por el primer bus de magnitudes muy similares.

La ventaja que presenta el HPC es la incorporación de un modelo predictivo en su diseño. Esto implica dos grandes fortalezas; en primer lugar, las acciones de control son modeladas en el horizonte de predicción logrando anticiparse a los efectos que el controlador experto no consideró. Como es el caso de la pérdida en tiempo de espera por proponer más acciones de control sin considerar la magnitud de la demanda involucrada y el efecto que la acción de control tendría sobre todo el sistema a futuro. En segundo lugar, el HPC permite incorporar una función objetivo que considera costos, tanto de los usuarios como de los operadores, que fácilmente puede ponderarse en caso de tener preferencia por uno u otro.

Como comentarios finales, en el diseño de la estrategia de control un elemento fundamental para la implementación de la acción de control de inyección de buses en ciclo corto constituye el horizonte de predicción, porque la reducción de la demanda intempestiva en paradero que causa mayores tiempos de espera solo puede ser vista con un mayor horizonte de predicción. Esto porque los buses inyectados ya estarán operando en el sistema, mientras más buses vea el modelo en operación mayor beneficio en la estrategia de inyección. Finalmente, en cuanto al controlador predictivo híbrido, la implementación de las tres estrategias de control resulta más efectiva que solo retención y salto, esto es razonable por cuanto la principal causa del tiempo de espera se asocia al excesivo número de usuarios en paradero, efecto que es minimizado con la implementación de la estrategia de inyección de buses en ciclo corto.



## 8 CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En este trabajo de tesis se presentó un diseño de estrategia de control predictivo híbrido sobre un corredor de transporte público, que entrega como acciones de control estrategias tales como, retención de bus en paradero, salto de estación e inyección de buses en ciclo corto, las cuales pueden ser implementadas en tiempo real por el operador del sistema. La estrategia de control dinámica propuesta junto con el diseño de un controlador experto simple se codificaron en una aplicación del microsimulador PARAMICS. Los experimentos fueron desarrollados en un escenario de demanda regular o base y otro de demanda incrementada. Cada experimento fue replicado 10 veces en el microsimulador con una duración de cada simulación de 1 hora. Los resultados fueron agrupados y analizados por tipo de demanda y tipo de controlador, experto simple ó predictivo híbrido. Las conclusiones obtenidas de la formulación y del análisis de resultados se resumen a continuación.

El diseño de la estrategia de control predictivo híbrido en tiempo real demuestra ser una herramienta útil que presenta beneficios tangibles a los usuarios del sistema estudiado, específicamente en la disminución del tiempo de espera de los usuarios en paradero; principalmente mediante la aplicación de las estrategias de retención y salto para el caso de demanda regular y de la estrategia de inyección de buses en ciclo corto para demanda incrementada.

Las estrategias de control de retención de bus en paradero y la de salto de estación son aplicables en sistemas de transporte público que operan bajo un nivel de operación regular con presencia de incidentes menores, donde la irregularidad en los intervalos de llegada o salida de buses desde paraderos son abordables con estas medidas. Mientras que para el caso de incidentes mayores, tales como un incremento intempestivo en la demanda, la estrategia de inyección de buses en tiempo real resulta conveniente; no así las estrategias de retención y salto que se vuelven inaplicables por la cantidad de usuarios perjudicados al interior de los buses retenidos.

En situaciones de incidentes intempestivos que producen un nivel de demanda muy alto comparado con la demanda normal, se sugiere en primer lugar abordar el problema más crítico, que es satisfacer la demanda de viajes a través de la estrategia de inyección exclusivamente. Conforme la demanda de usuarios retorne al valor promedio, se sugiere la aplicación de estrategias como retención y salto de estación. Claramente se vio mediante la validación del diseño de la estrategia de control integrada que el beneficio entregado por los dos controladores, experto simple y predictivo híbrido se vio limitado por la demanda excesiva.

El controlador predictivo híbrido es comparado con un controlador experto simple con las mismas estrategias de retención, salto e inyección de buses en ciclo corto, basado en los mismos tipos de eventos. Bajo las mismas premisas de modelación, se encontró que el comportamiento del controlador predictivo híbrido produce un ahorro en el tiempo de espera en paradero del orden del 7 % contra un 3 % del controlador experto simple para demanda base. En el caso de demanda incrementada, la magnitud del ahorro de tiempo de espera para los dos controladores, predictivo híbrido y experto simple, con las tres estrategias incluidas es del orden del 15%.

En cuanto a costos de operación, se puede observar que el controlador predictivo híbrido entrega menor número de inyecciones al sistema, específicamente 2 frente a 8 inyecciones que propone el experto simple. El menor número de inyecciones del controlador predictivo está asociado a la función objetivo del controlador predictivo híbrido que busca no tan solo minimizar el costo de los usuarios sino también el costo de los operadores a través del tamaño de flota en operación. Cabe mencionar que el costo de operación por inyección realizada por cada tipo de controlador marca una diferencia entre los dos tipos de controladores. En el caso del predictivo híbrido el costo por inyección realizada es de 910 [\$/bus] mientras que el experto simple tiene un costo asociado del orden de 4169 [\$/bus].

El diseño de la estrategia de control predictivo híbrido es un sofisticado medio de solución de algunos de los más recurrentes y graves problemas surgidos en tiempo real en la operación de los sistemas de transporte público. Este diseño de estrategias de control dinámico puede ser extendido a sistemas de transporte más complejos. Adicionalmente, el modelo predictivo podría utilizar un horizonte de predicción más extenso, siempre y cuando el tiempo computacional asociado a la simulación del diseño de la estrategia se mantenga o se reduzca.

El diseño propuesto tiene algunas extensiones que harían que este proyecto se torne una herramienta aplicable en el corto plazo, principalmente en el ámbito de simulación de proyectos asociados a los sistemas de transporte público de superficie. Específicamente, la extensión se refiere a incorporar un predictor de demanda y un algoritmo eficiente de solución al problema de optimización del controlador propuesto.

La demanda de usuarios que llegan al sistema constituye un elemento importante en el diseño de la estrategia de control. Por esta razón, se recomienda implementar un detector de falla que sea capaz de reconocer a nivel espacial y temporal un incremento de demanda perjudicial que afecte gravemente al nivel de servicio y un predictor de demanda de usuarios en paradero más sofisticado.

En segundo lugar, se recomienda implementar en futuras extensiones de este trabajo un enfoque local para el análisis en el diseño de la estrategia de control. Específicamente, se refiere a acotar el análisis al sector de interés del modelador. En este caso, el lugar donde se genera un evento y considerar exclusivamente los siguientes eventos inmediatamente generados en dicho sector. Una experiencia similar se encuentra en desarrollo en un trabajo de investigación relacionado con un predictor de demanda aplicable al sistema de transporte público, en el cual el predictor de demanda se enfoca en un sector de análisis.

El problema de optimización del diseño propuesto fue resuelto mediante enumeración explícita, este método es bastante aproximado a la realidad, sin embargo requiere mucho tiempo computacional. Una alternativa a este método de solución son algoritmos evolutivos que se emplean en la actualidad tales como *Genetic Algorithms* (GA) que se utilizó en Sáez (2010) con resultados promisorios y otros como *Particle Swarm Optimization* (PSO) y *Evolutionary Multiobjective Optimization* (EMO).

Finalmente se recomienda optimizar el código de MISTRANSIT CON ESTRATEGIAS, considerando dos aspectos principales, reducir el tiempo de cada simulación y mejorar el modelo predictivo del diseño de la estrategia de control, que considera simplificaciones en la modelación de la operación del sistema de transporte.

A futuro la implementación del diseño de la estrategia de control en tiempo real sobre la operación del sistema de transporte público ahorraría notablemente costos a los operadores y mejoraría el nivel de servicio para los usuarios, objetivos que están internalizados en la función objetivo del controlador predictivo híbrido. Ventaja que supera notablemente a controladores más sencillos como el experto simple.

## 9 REFERENCIAS

- Abkowitz, M., Eiger, A., Engelstein, I. 1986. Optimal control of headway variation on transit routes. *Journal of Advanced Transportation*, 20, 73 – 78.
- Abkowitz, M., Tozzi, J. 1986. Transit route characteristics and headway-based reliability control. *Transportation Research Record*, N° 1078, 11-16.
- Ben-Akiva, M., Lerman, S. 1985. *Discrete choice analysis: theory and applications to travel demand*. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- Blume, S. 1980. The effectiveness of near-optimal headway control for transit systems. M.S. thesis, Northwestern University.
- Ceder, A. 1989. Optimal design of transit short-turn trips. *Transportation Research Record* 1221, 8–22.
- Cortés, C. E., Nuñez, A., Sáez, D. 2008. Hybrid adaptive predictive control for a dynamic pickup and delivery problem including traffic congestion. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 22, 103-123.
- Cortés, C. E., Burgos, V., Fernández, R. 2010. Modelling passengers, buses and stops in traffic microsimulation: review and extensions. *Journal of Advanced Transportation*, 44, 72 - 88.
- Cortés, C.E., Saéz, D., Milla, F., Riquelme M., Nuñez, A. 2010. Hybrid predictive control for real-time optimization of public transport systems' operations based on evolutionary multiobjective optimization. *Transportation Research C*. doi:10.1016/j.trc.2009.05.016
- Chira-Chavala, T., Gillen, D., Klieman, L., Marshall, A., 1999. Bus operations in Santa Clara Country, Potential uses of AVL and framework for evaluating control strategies. Institute of Transportation Studies University of California, Berkeley. California PATH Research Report. UCB-ITS-PRR-99-25.
- Delle Site, P.D., Filippi, F. 1998. Service optimization for bus corridors with short-turn strategies and variable vehicle size. *Transportation Research A* 32(1), 19–28.
- Desaulniers, G., Hickman, M. 2003. *Public Transit*. Les Cahiers du GERAD.
- 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.
- Eberlein, X. 1995. Real-time control strategies in transit operations: models and analysis. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.

- Eberlein, X., Wilson, N., Bernstein, D. 1999. Modeling real-time control strategies in public transit operations: N.H.M. Wilson, (ed.), *Computer-Aided Transit Scheduling*, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems 471, Springer-Verlag, Heidelberg, 325-346.
- Eberlein, X., Wilson, N., Bernstein, D. 2001. The holding problem with real-time information available. *Transportation Science* 35(1), 1-18.
- Fernández, R., Cortés, C. E., Burgos, V. 2010. Microscopic simulation of transit operations: policy studies with the MISTRANSIT application programming interface. *Transportation Planning and Technology*, Vol 33, N° 2, 157-176.
- FHWA . 1996. CORSIM User manual, Version 1.01. Federal Highway Administration.
- Fu, L., Liu, Q. 2003. A real-time optimization model for dynamic scheduling of transit operations, 82<sup>nd</sup> Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC.
- Furth, P. 1988. Short turning on transit routes. *Transportation Research Record* 1108, 42–52.
- Furth, P., 1986. Zonal route design for transit corridors. *Transportation Science* 20 (1), 1–12.
- Goeddel, D. 1996. Benefit assessment of advanced public transportation systems. Technical Report DOT-VNTSC-FTA-96-7, Federal Transit Administration, Washington, DC.
- Hall R.W., Dessouky M., Nowroozi A., Singh A. 1997. Evaluation of ITS technology for bus timed transfer, Final report, California PATH.
- Hickman, M. 2001. An analytic stochastic model for the transit vehicle holding problem. *Transportation Science* 35(3), 215–237.
- Jayakrishnan, R., Cortés C.E., Lavanya, R, Pagès, L. 2003. Simulation of urban transportation networks with multiple vehicle classes and services: classifications, functional requirements and general – purpose modelling schemes. Proceedings of the 82<sup>th</sup> Transportation Research Board Annual Meeting, Washington D. C., January 2003.
- Jansson, J. O. 1980. A simple bus line model for optimization of service frequency and bus size. *Journal of Transport Economics and Policy*. 14, 53–80.
- Jordan, W. C., Turnquist, M.A., 1979. Zone scheduling of bus routes to improve service reliability. *Transportation Science* 13(3), 242-268.
- Kemp, M. 1973. Some evidence of transit demand elasticities. *Transportation* 2(1), 25-52.
- Li, Y., Rousseau, J.-M., Gendreau, M. 1991. Real-time scheduling on a transit bus route : A 0-1 stochastic programming model, Proceedings of the Thirty-Third Annual Meeting, Transportation Research Forum, 157-166.

Lin, G., Liang P., Schonfeld, P., Larson, R. 1995. Adaptive control of transit operations. Final Report Project MD-26-7002, University of Maryland.

Liu, G. 1995. Time points and schedule design for a fixed transit route adopting a holding control strategy. Ph. D. Dissertation, research CE95-4, Department of Civil Engineering, University of Calgary.

Liu, R. (2003). DRACULA Traffic model user manual, Version 2.0. Institute for Transport Studies, University of Leeds.

O'Dell, S., Wilson, N. 1999. Optimal real-time control strategies for rail transit operations during disruptions. N.H.M. Wilson (ed.), Computer-Aided Transit Scheduling, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems 471, Springer-Verlag, Heidelberg, 299–323.

Osuna, E.E., Newell, G.F., 1972. Control strategies for an idealized public transportation system. *Transportation Science* 6, 52-72.

Otárola, G., Cortés, C., Sáez, D. 2008. Control predictivo basado en semáforos de prioridad para transporte público. *Revista Chilena de Ingeniería. Anales del Instituto de Ingenieros de Chile* 120(3), 125-133.

PTV . 2003. VISSIM User manual, Version 3.7. Karlsruhe: PVT.

Pillajo, A., Delgado, F., Milla F., 2007. Design of fuzzy expert control strategies for a public transport system. IV Escuela de Verano Latinoamericana en Inteligencia Computacional, EVIC 2007.

Quadstone. 2003. PARAMICS Modeller and programmer reference manual, Version 4.2. Quadstone Ltda.

Romero, C. 2008. Microsimulación de estrategias planificadas de operación para un corredor de transporte público. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile.

Sáez, E. 2007. Estrategias de control predictivo híbrido en tiempo real para sistemas de regulación de intervalos en sistemas de transporte público. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Electricista, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Chile.

Sáez, D., Cortés, C., Sáez, E., Riquelme, M., Milla, F. 2009 (in press). Station control strategies based on fuzzy expert rules for the operation of a public transport system. *Transportation Research Part C*, Elsevier.

Sáez, D., Cortés, C., Sáez, E., Riquelme, M., Núñez, A., Tirachini, A. 2010 (in press). Hybrid predictive control strategy for a public transportation system with uncertain demand. *Transportmetrica*, Taylor & Francis Group.

SMARTTEST. 1999. Simulation modelling applied to road transport european scheme tests, University of Leeds, Leeds. [www.its.leeds.ac.uk/projects/smartest](http://www.its.leeds.ac.uk/projects/smartest).

Senevirante, P.N. 1990. Analysis of on-time performance of bus services using simulation. *Journal of Transportation Engineering* 116(4), 517-531.

Silva P. C. M .2000. Simulating bus stops in mixed traffic. *Traffic Engineering and Control* 41 (4). 160-167.

Shen, S., Wilson, N. 2001. An optimal integrated real-time disruption control model for rail transit systems. In: S. Voss and J. Daduna (eds.), *Computer-Aided Scheduling of Public Transport, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems* 503, Springer-Verlag, Heidelberg, 335–363.

Sun, A., Hickman, M. 2004. The holding problem at multiple holding stations, 9th International Conference on Computer-Aided Scheduling of Public Transport (CASPT), San Diego, EE.UU.

Sun, A., Hickman, M., 2005. The real-time stop-skipping problem, *Journal of Intelligent Transportation Systems* 9 (2), 91–109.

Tirachini, A., Cortés, C.E., Jara-Díaz, S. 2010. Optimal design and benefits of a short turning strategy for a bus corridor. *Transportation*, Springer Science.

Tirachini A., Cortés, C.E. 2007. Disaggregate modeling of pre-planned short-turning strategies in transit corridors, *Proceedings of 86<sup>th</sup> Annual Meeting, TRB, Washington DC*.

TSS. 2004. GETRAM/AIMSUM User manual, Version 4.2. *Transport Simulation Systems*.

Vijayaraghavan, T. 1988. Vehicle scheduling in urban transportation with quick and cut trip insertions for fleet size reduction. *Transportation Planning and Technology* 12, 105-120.

Vijayaraghavan, T., Anantharamaiah, K. 1995. Fleet assignment strategies in urban transportation using express and partial services. *Transportation Research-A* 29, 157-171.