

Agradecimientos.

Dedico este trabajo a mi familia, a mi madre, mi padre y mi hermano, quienes han estado conmigo en estos largos años, y con quienes compartí momentos de felicidad y tristeza. Y a Paulina, por su amor y comprensión. Nunca podré pagar el apoyo y la comprensión que me brindaron, y que tanto me ayudaron en este camino que llega a su fin.

Quiero agradecer a mi profesor guía, Cristián Cortés, por compartir parte de su conocimiento y experiencia, a mi profesora co-guía, Doris Sáez, por el apoyo y la motivación a este trabajo y al profesor Aldo Cipriano, profesor integrante de la comisión, por su buena disposición y sus importantes aportes al contenido de este trabajo.

Agradezco también al Departamento de Ingeniería Civil en Transporte, al cual pertenezco, en especial a la Profesora Marcela Munizaga, por su aporte en la elaboración de mi memoria. También a la gente del Laboratorio de Control Avanzado del Departamento de Ingeniería Eléctrica y al Proyecto Anillo ACT-32/2006, por financiar esta memoria.

Por último, a mis amigos y compañeros, por su amistad y camaradería.

Tabla de Contenidos

Agradecimientos.....	i
Tabla de Contenidos	ii
Resumen.....	iii
1. Introducción.....	1
1.1. Motivación.....	1
1.2. Objetivos.....	2
1.2.1. Objetivo General.....	2
1.2.2. Objetivos Específicos.....	2
1.3. Estructura.....	3
2. Revisión Bibliográfica.....	4
2.1. Control de Tráfico en Tiempo Real.....	4
2.2. Estrategias de Prioridad para Buses.....	6
2.2.1 Clasificación por Lógica de Control.....	7
2.2.1.1. Estrategias Pasivas.....	7
2.2.1.2. Estrategias Activas.....	7
2.2.1.3. Estrategias Adaptivas.....	9
2.2.2 Clasificación por Alcance de la Estrategia.....	12
2.2.2.1. Intersección.....	12
2.2.2.2. Arteria y Red.....	12
2.3. La Demanda de Transporte Público y Privado.....	13
3. Planteamiento del Problema.....	14
3.1. Formulación del Modelo de Demanda de Transporte Privado.....	14
3.1.1. Demanda de Transporte Privado.....	14
3.1.2. Predicción de Demanda de Transporte Privado.....	17
3.1.2.1. Predicción de Vehículos que Entran a la Red.....	17
3.1.2.2. Predicción de Virajes al Interior de la Red.....	18
3.1.2.3. Ajustes a la Predicción.....	19
3.2. Formulación del Problema de Control para un Semáforo Aislado.....	21
3.2.1. Esquema de Control Predictivo Híbrido.....	21
3.2.2. Función Objetivo.....	35
3.3. Formulación del Problema de Coordinación entre Semáforos.....	37
3.4. Implementación de los Algoritmos Propuestos.....	40
3.4.1. Algoritmo de Simulación de Demanda de Transporte Privado.....	40
3.4.2. Algoritmo Predictivo para Control de Semáforos.....	43
4. Resultados.....	44
4.1. Comparación entre Escenarios de Control.....	46
4.2. Sensibilidad con Respecto a los Parámetros.....	52
4.3. Sensibilidad con Respecto a la Demanda.....	55
4.4. Sensibilidad con Respecto al Horizonte de Predicción.....	59
5. Discusión.....	61
5.1. Análisis de Resultados.....	61
5.2. Factibilidad de Implementación.....	63
6. Conclusiones.....	65
7. Trabajo Futuro.....	67
7.1. Extensión a Redes.....	67
7.2. Modelamiento del Proceso.....	67
7.3. Mejoras a la Predicción.....	67
7.4. Estrategias de Planificación de Flota.....	68
7.5. Algoritmos Evolutivos.....	68
8. Bibliografía y Referencias.....	69
Anexos.....	71

Resumen.

En esta memoria se desarrolla una estrategia de control predictivo híbrido para un sistema de transporte público, que comprende acciones de control en tiempo real sobre buses y semáforos del sistema. El objetivo de esta estrategia es optimizar el funcionamiento de una flota de buses, esto es reducir tiempos de espera en paraderos y demoras en semáforos.

Se expone los trabajos y formulaciones existentes sobre control de tráfico en tiempo real, con énfasis en el tema de prioridad para transporte público.

Basándose en el tratamiento dado al transporte privado en la literatura especializada, en la que se da gran importancia a los largos de cola, se propone una formulación para la demanda de transporte privado. Asimismo, se formula un problema de control de semáforos y buses que contempla impactos en el transporte privado.

Para lograr el objetivo propuesto se diseña un simulador de tráfico que se integra a una plataforma de simulación de transporte público. Sobre este sistema integrado se propone y prueba diferentes metodologías de control que incluyen estrategias de *holding* (retención en paraderos) y *station skipping* (salto de paraderos) y extensión y adelantamiento de verde con prioridad para buses en semáforos. Cada una de estas estrategias se verifica en forma separada y también de manera integrada, lo cual permite constatar que la estrategia integrada ofrece mejoras importantes.

Se evalúa la sensibilidad de la estrategia integrada, con respecto a las condiciones de demanda, lo que revela la importancia de la distribución de demanda privada por sobre la magnitud de la misma. La estrategia se sensibiliza también con respecto a los parámetros de control, lo que muestra alta sensibilidad con respecto al horizonte predicción.

Se concluye que la estrategia genera buenos resultados, disminuyendo los tiempos de espera en aproximadamente un 45% y demoras en semáforos en aproximadamente un 56% con respecto a un sistema sin control. Por su parte, la regularidad de intervalos, se mantiene en niveles similares. Sin embargo, para lograr tales resultados, se requiere de la implementación de tecnología que permita estimar tiempos de llegada a semáforos, cargas de pasajeros en buses y destino de los viajes de cada pasajero.

Por otro lado, los desarrollos logrados durante este trabajo permiten continuar con la investigación en esta línea, así como la extensión a casos más complejos.

1. Introducción.

1.1. Motivación.

Entre los grandes desafíos que enfrentan las grandes ciudades en la actualidad se destaca ofrecer un Servicio de Transporte Público de calidad. Las principales variables utilizadas para medir la calidad del servicio son: los tiempos de viaje y tiempos de espera experimentados por los usuarios del sistema. La dotación de infraestructura puede contribuir a mejorar estos indicadores, disminuyendo estos tiempos, por ejemplo, vía la implementación de corredores segregados para transporte público. Sin embargo, estas soluciones tienen limitaciones de costo y a nivel de ciudad existen restricciones de uso del espacio urbano. Entonces, de forma alternativa y/o complementaria a la provisión de infraestructura, está la implementación de medidas de gestión más eficientes.

Se ha demostrado que mantener la regularidad de intervalos entre buses aumenta la confiabilidad del sistema y reduce los tiempos de espera promedio de los usuarios (Osuna & Newell, 1972). Sin embargo, los fenómenos de tráfico están sujetos a diversas fuentes de estocasticidad, como son la demanda en paraderos y terminales, la congestión, ocurrencia de accidentes e intersecciones semaforizadas que enfrentan los buses, etc. Estos factores hacen difícil mantener la regularidad de intervalos mediante una planificación fija establecida a-priori.

Actualmente existen recursos tecnológicos para obtener información detallada de todos los elementos del sistema en tiempo real, y por lo tanto es posible realizar un mejor control dinámico del sistema de buses ante cambios, tanto en la demanda como en las condiciones de tráfico. Se dispone de tecnología como GPS y *transponders*, análisis digital de imágenes, uso de semáforos actuados, entre otros elementos. El uso de esta tecnología hace posible conocer en cada momento la demanda por transporte público y la posición de los buses, con lo que se puede controlar en forma más eficiente la magnitud de los intervalos entre pasadas de buses.

Entre las estrategias propuestas en la literatura, principalmente para regularizar intervalos de buses, están aquellas que se pueden llevar a cabo en los paraderos, como son el *holding* (que consiste en retener un bus en paraderos específicos por un tiempo determinado) y *station skipping* (que consiste en hacer que el bus se salte un paradero). Estas estrategias son utilizadas para frenar y acelerar respectivamente un bus determinado que haya perdido el intervalo adecuado con el bus precedente. Sin embargo, el uso de estas estrategias no será siempre efectivo a menos que se coordine su acción con los tiempos de los semáforos involucrados, puesto que estos podrían, por ejemplo, retrasar a un bus que se ha tratado de acelerar mediante las estrategias que se llevan a cabo en paraderos, más aún si el operador tiene la posibilidad de controlar algunos semáforos para entregar prioridad a los buses.

El objetivo de esta memoria es diseñar una estrategia de control de prioridad en semáforos que en conjunto con las estrategias *holding* y *station skipping*, permita

optimizar el desempeño de un servicio de buses con demanda estocástica, tanto de transporte público como privado. La formulación de esta estrategia se construirá sobre una formulación de Control Predictivo para las operaciones de un recorrido aislado de buses, donde ya se incorpora *holding* y *station skipping* (Sáez et al, 2007).

1.2. Objetivos.

1.2.1. Objetivo General.

Desarrollar una estrategia de control predictivo basada en semáforos de prioridad para buses, que en conjunto con las estrategias predictivas de *holding* y *station skipping*, permita optimizar en tiempo real el funcionamiento de una flota de buses de transporte público.

Para lo anterior se tendrá en cuenta los efectos que esta estrategia puede provocar en los usuarios de transporte privado, cuyo comportamiento similar a los buses será modelado mediante simulación por eventos en tiempo discreto.

1.2.2. Objetivos Específicos.

- Formular la demanda de transporte privado.
- Formular el problema de control para un semáforo aislado con prioridad para el transporte público y demanda estocástica.
- Simular el problema de control para un semáforo aislado con prioridad para transporte público.
- Extender la formulación del problema de control para un semáforo aislado, de manera de integrar interacciones entre semáforos y estaciones.
- Simular el problema de control para dos semáforos coordinados.
- Integrar la formulación de control para dos semáforos coordinados a un programa de simulación de eventos en tiempo discreto, donde ya se encuentran integradas las estrategias de *holding* y *station skipping*.

1.3. Estructura.

En este trabajo se distinguen claramente tres partes fundamentales: la primera de éstas es una reseña de las investigaciones que se han realizado sobre el tema de control de intersecciones semaforizadas. Luego la formulación de una estrategia de control basada en la investigación previa. Finalmente el análisis de los resultados de dicha estrategia.

En el Capítulo 1 se presenta una introducción al tema y se detalla objetivos y metodología. El Capítulo 2 muestra un resumen de la literatura especializada referida al tema de control de tráfico, enfocándose en el control en tiempo real con prioridad para transporte público. En el Capítulo 3 se detallan los aspectos teóricos de la formulación, la modelación del problema y la programación del modelo en la plataforma *MATLAB*. En los Capítulos 4 y 5 se muestra y discute respectivamente los resultados obtenidos y su factibilidad.

En el Capítulo 6 se presenta las conclusiones del trabajo realizado, mientras que en el Capítulo 7 se propone temas de investigación que permitirán extender y perfeccionar los modelos propuestos. Los anexos se adjuntan en formato digital e incluyen: bibliografía y resultados.

2. Revisión Bibliográfica.

En este capítulo se revisará la literatura relacionada con control de tráfico y prioridad para transporte público. Primero se muestra aspectos técnicos del control de tráfico, luego se revisa el tema particular de prioridad para buses, clasificando las estrategias según lógica de control y alcance. Finalmente se expondrá la importancia de la demanda en la modelación.

2.1. Control de Tráfico en Tiempo Real.

Comúnmente, los parámetros de control de una red o eje vial se generan con datos de demanda históricos, con los que se calculan parámetros como tiempos de ciclo y repartos de verde. Para optimizar el funcionamiento del sistema, se utilizan herramientas de coordinación entre señales. Con esto se pueden definir desfases entre verdes de semáforos sucesivos (ROESS, 2004). A pesar de la implementación de tales medidas, pueden ocurrir sucesos inesperados, y afectar de forma negativa el funcionamiento del sistema.

El control de tráfico en tiempo real permite modificar parámetros de control de una red de tráfico tales como: largos de ciclo, tiempos de verde, desfase entre intersecciones, etc. Estas modificaciones permiten mejorar el funcionamiento de la red ante perturbaciones, tales como: accidentes, aumentos de demanda inesperados, etc. Tales perturbaciones pueden llevar al sistema a un estado distinto al estado promedio con el que dichos parámetros se calcularon, generando problemas como: bloqueos de intersecciones por colas extensas, aumento de tiempos de viaje y de espera, detenciones innecesarias en semáforos, etc. Estos problemas se generan porque los parámetros del sistema no son los adecuados para la situación actual, por lo tanto, es necesario ajustarlos a dicha situación.

En la literatura especializada sobre control de tráfico se han analizado diferentes enfoques para decidir que estrategia de control es apropiada de ejecutar, es decir, que parámetros ajustar, frente a distintas situaciones de tráfico.

Existen aquellas que partiendo de la búsqueda del óptimo global generan modelos simplificados, que son más eficientes en tiempo de ejecución y por ende aplicables a un esquema en tiempo real. Tales modelos usan por ejemplo algoritmos de programación dinámica para calcular los tiempos en los que se deben realizar los cambios de fase al interior de un ciclo del semáforo, tomando en cuenta la situación actual y considerando además predicciones de escenarios futuros; un ejemplo de esto es OPAC (*Optimization Policies for Adaptive Control*) (Gartner, 1983).

Otro ejemplo de este tipo de estrategias es TUC (*Traffic-responsive Urban Control*) (Diakaki et al, 2002), donde se optimiza todos los tiempos de verde de una red basándose en los flujos en los arcos y en una matriz de control. Dicha matriz depende de la topología de la red y de las restricciones de funcionamiento de ésta. Por lo tanto, debe ser calibrada para cada caso en particular.

Un defecto de las formulaciones anteriores es que a pesar de ser simplificaciones, se basan en modelos que buscan el óptimo, y por lo tanto, podrían no ser eficientes en problemas más grandes, donde se deben considerar varios escenarios posibles, con distintas acciones de control y distintas demandas; un ejemplo de esto se da cuando se usa control predictivo. En tales casos los tiempos de ejecución crecen y el método deja de ser aplicable en tiempo real. Por esto, en esta materia han resultado más populares los modelos basados en reglas (Yagar & Han, 1993; Dion & Hellinga, 2002; Felici et al, 2006). Tales modelos no buscan la solución óptima para cualquier situación, sino que ejecutan acciones de control basadas en la ocurrencia de eventos claves, los cuales se definen en las reglas del controlador. Dichos eventos pueden ser: colas muy extensas o ausencia de vehículos en alguno de los arcos de la intersección. Por otra parte, las acciones de control propuestas son extensión de verde o salto de fase para los casos descritos arriba respectivamente. Estos modelos no buscan el óptimo, pero escogen una solución entre un conjunto de posibles soluciones factibles, tal que se minimice un índice de rendimiento. Un ejemplo de esto se muestra en la sección *Estrategias Adaptivas*, donde lo que se busca es minimizar el índice de la fórmula (2.1), que es usado en el modelo SPPORT (*Signal Priority Procedure for Optimization in Real Time*) (Yagar & Han, 1993). Este índice se calcula considerando tiempos de viaje, tiempos de espera y detenciones por usuario, pues los tiempos se ponderan por la tasa de ocupación de los vehículos.

En el ámbito de la simulación, la mayoría de los autores usan programas comerciales de microsimulación de tráfico, tales como PARAMICS, VISSIM, AIMSUM y MITSIM (Davol, 2001), entre otros. Sin embargo, existen autores cuya línea de investigación los ha llevado al diseño de nuevos simuladores. Un ejemplo de esto es el uso de autómatas celulares en microsimulación (Spyropoulou, 2007), que muestran buenos tiempos de ejecución. Se han ejecutado modificaciones sobre estos algoritmos, de manera de hacerlos más realistas, sin perder eficiencia en tiempos de ejecución.

Las estrategias mencionadas anteriormente se enfocan en mejorar el rendimiento global del sistema, del cual el transporte público es un componente más. Sin embargo, hay otras estrategias que se centran en el tema de prioridad a transporte público. A continuación se expone ambos tipos de trabajos, poniendo énfasis esta vez en el tratamiento que se da al transporte público.

2.2. Estrategias de Prioridad para Buses.

El objetivo de otorgar prioridad al transporte público es reducir las demoras de los buses, tal como se puede apreciar en la Figura 2.1. La razón de implementar la prioridad es la mayor capacidad de los buses frente a la de los vehículos de transporte privado. Tradicionalmente, el control de tráfico ha buscado reducir las demoras por vehículo. Sin embargo, esto podría no ser óptimo si se considera la ocupación de los vehículos, que es más alta en los buses. Por lo tanto, el otorgar prioridad a los buses podría reducir las demoras de los pasajeros, afectando a los usuarios de transporte privado.

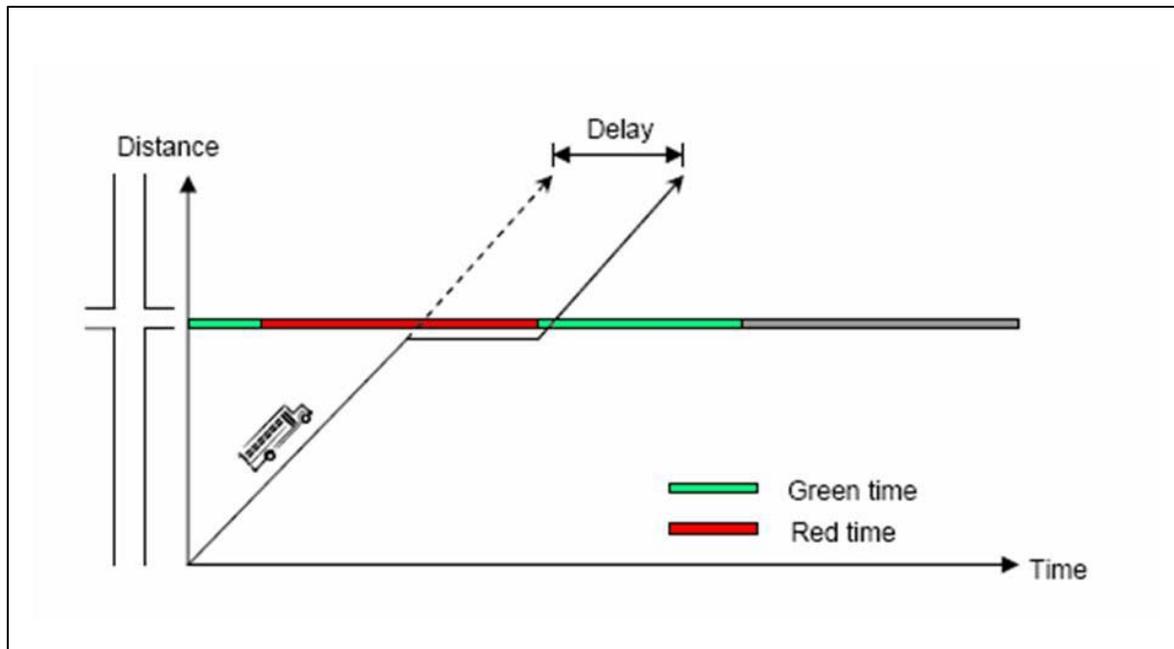


Figura 2.1. Esquema de operación para buses sin prioridad.

Fuente: Kim & Rillet, 2005.

En la literatura sobre prioridad para transporte público existen numerosos desarrollos que intentan implementar esta clase de prioridad. Se designa al acceso que usan los servicios de transporte público en la intersección como fase prioritaria, es decir, aquella que puede potencialmente recibir un tratamiento preferencial en la intersección semaforizada. Por otra parte, el resto de las fases, es decir las fases no prioritarias, sufren los impactos de dichos tratamientos preferenciales.

La mayoría de los desarrollos mencionados basan sus conclusiones en simulaciones que se desarrollan en diferentes plataformas como TRANSYT o PARAMICS, dependiendo del caso, e incluso existen experiencias en terreno (Li et al, 2005). Sin embargo se debe ser cuidadoso al diseñar una estrategia de control, pues no siempre es óptimo dar prioridad a los buses. En algunos casos lo importante es que estos mantengan un intervalo regular (Furth & Muller, 2000), pues esto contribuye a disminuir los tiempos de espera en los paraderos (Osuna & Newell, 1972).

Dependiendo de la lógica de control que se utilice, las estrategias se pueden clasificar como sigue:

- Estrategias pasivas.
- Estrategias Activas.
- Estrategias Adaptivas.

2.2.1 Clasificación por Lógica de Control.

2.2.1.1. Estrategias Pasivas.

Las estrategias pasivas son aquellas que usan tiempos fijos para las fases de la intersección. Estas se calculan mediante demandas promedio en los accesos de la intersección, y no requieren de gran infraestructura, lo que las hace más baratas en comparación con los otros tipos de estrategias. Este tipo de estrategias se ha probado mediante simulación en plataformas como TRANSYT (Skabardonis, 2000). Sin embargo, generan demoras innecesarias en fases no prioritarias debido a que no pueden predecir cambios en las condiciones de tráfico.

2.2.1.2. Estrategias Activas.

Las estrategias activas permiten generar cambios en las asignaciones de tiempo de las fases del semáforo basándose en la demanda actual, por esto requieren de detectores y microprocesadores para calcular o estimar dicha demanda en tiempo real. Las medidas que pueden adoptarse en esta clase de estrategias son: extensión del verde, adelantamiento de verde e inserción de fase (Kim & Rillet, 2005; Davol, 2001). Sin embargo, las más citadas en la literatura son: extensión y adelantamiento de verde.

La estrategia de extensión de verde, que se muestra en la Figura 2.2, es aplicable cuando se predice la llegada del bus a la intersección cerca del final del verde de la fase prioritaria. Por otro lado, el adelantamiento de verde, mostrado en la Figura 2.3 es conveniente si la llegada del bus ocurre cerca de inicio del verde de la fase prioritaria. Si no se dan estas condiciones, entonces se puede usar la estrategia de la Figura 2.4, la inserción de fase. Los intervalos en los que es posible aplicar una u otra estrategia se encuentra definidos en (Balke et al ,2000).

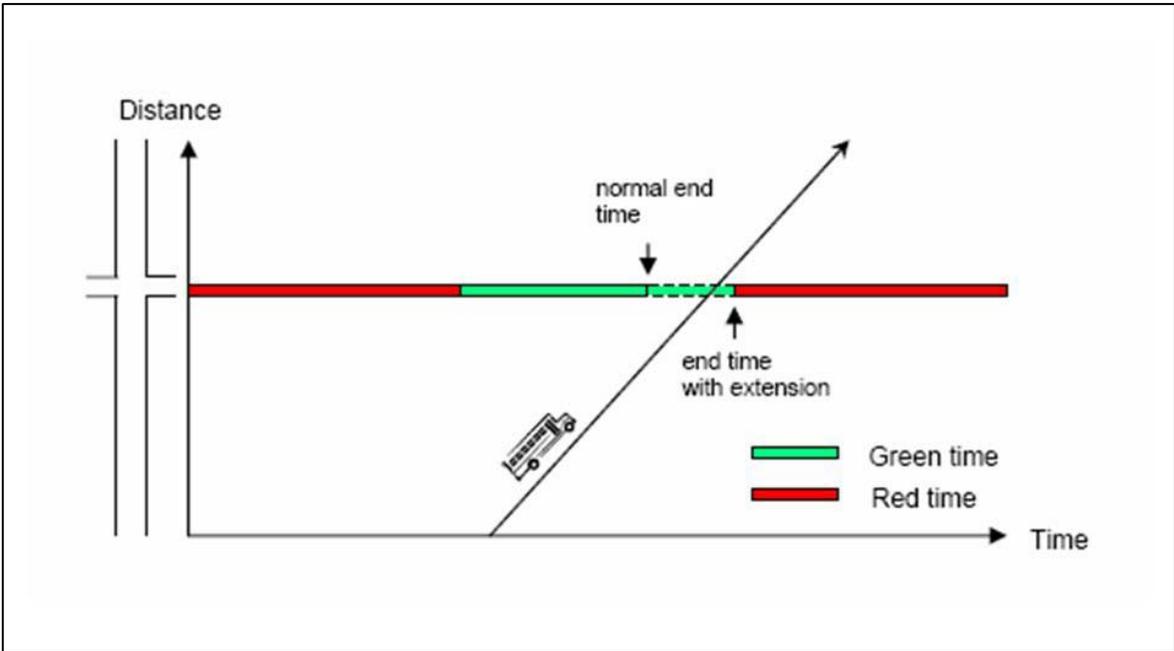


Figura 2.2. Estrategia de extensión de verde.
 Fuente: Kim & Rillet, 2005.

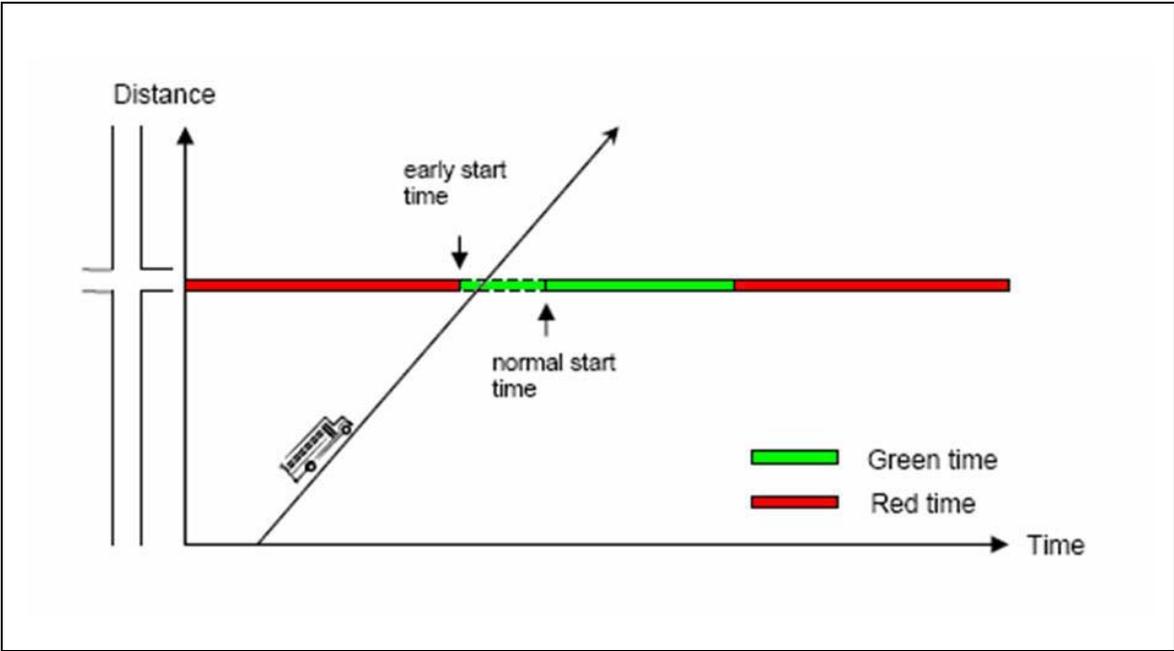


Figura 2.3. Estrategia de adelantamiento de verde.
 Fuente: Kim & Rillet, 2005.

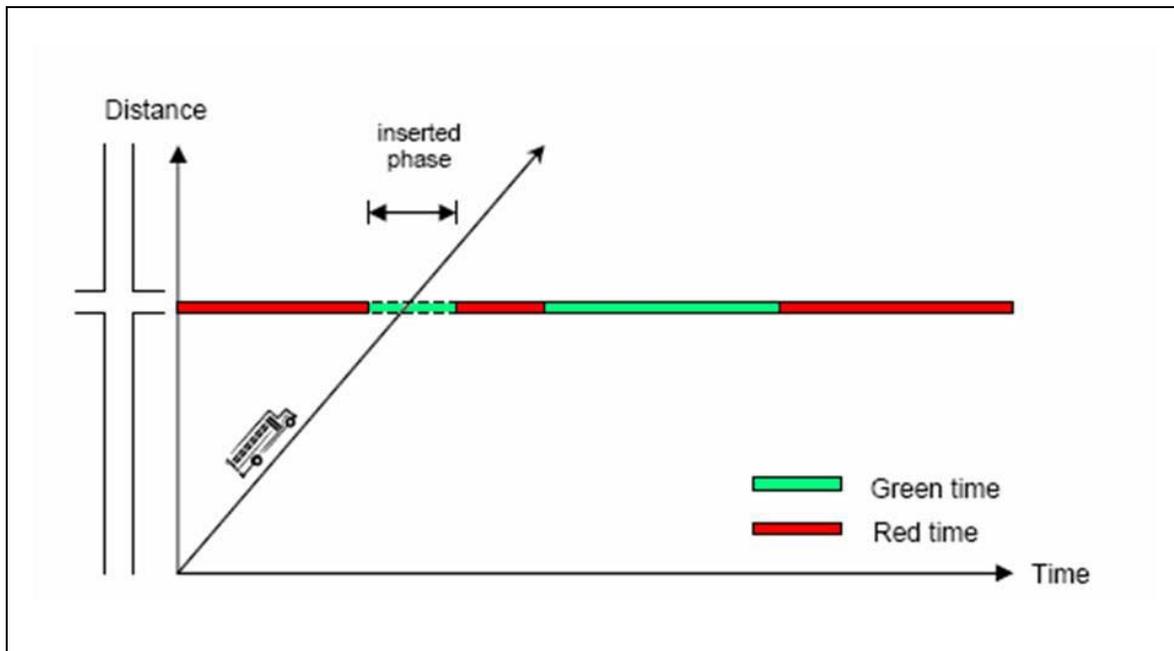


Figura 2.4. Estrategia de inserción de fase.
Fuente: Kim & Rillet, 2005.

Un efecto adverso de las estrategias activas es que producen impactos negativos en las ramas (o fases) no prioritarias de una intersección, lo que se hace aún más notable en los períodos punta. Lo anterior se debe a que la acción sobre el semáforo se ejecuta cada vez que aparece un bus, lo cual se denomina prioridad incondicional. Este efecto negativo puede aminorarse si se usa lo que se denomina prioridad condicional (Furth & Muller, 2000), que consiste en dar prioridad sólo a buses que lo requieran, es decir a aquellos que estén retrasados respecto de su itinerario. Bajo este mismo enfoque pueden considerarse otras variables, como por ejemplo la ocupación de los buses, lo que permitiría negar la prioridad a un bus con pocos pasajeros en beneficio de las fases no prioritarias, cuando éstas se encuentren congestionadas.

2.2.1.3. Estrategias Adaptivas.

La diferencia de este tipo de estrategias con las activas, es que las adaptivas incorporan explícitamente criterios de optimización para decidir si se da prioridad, además de la manera en que se provee tal propiedad. Esto implica que no es seguro que siempre se otorgue prioridad cuando aparece un bus. Tales criterios de optimización incluyen los efectos de las estrategias de prioridad para transporte público sobre el resto del tráfico.

Se han usado diversas metodologías de control para abordar este problema. La complejidad de este tipo de problemas es que pueden existir varias opciones de medidas de control susceptibles de ser evaluadas para distintas condiciones de tráfico, lo que puede significar tiempos de ejecución grandes. Sin embargo, para que todo lo anterior sea compatible con control en tiempo real, la solución debe encontrarse de forma rápida. Se busca entonces una metodología que pueda comparar variadas estrategias, y que además encuentre una buena solución de forma rápida.

Entre estas metodologías, se destaca el uso de un algoritmo genético alimentado con información de demanda histórica. Usando esta demanda, el algoritmo genético genera un conjunto de soluciones, de las cuales se escoge la que minimiza un índice de rendimiento que considera las demoras y detenciones por tipo de vehículo. Lo que se pretende con esto es generar una relación entre las condiciones de tráfico y las acciones de control que conviene implementar. Luego, se usa este algoritmo para entrenar una red neuronal que recibe las condiciones de tráfico en tiempo real e implementa las mejores acciones de control de acuerdo a como fue entrenada (Duerr, 2000). Lo anterior permite a la red neuronal crear una función que recibe como entrada las condiciones de tráfico y retorna las acciones de control más cercanas al óptimo encontrado por medio del algoritmo genético.

Existe otro tipo de metodologías, las cuales consisten en la formulación de reglas (Lee et al, 2005). Estas reglas indican qué acción tomar si un evento determinado ocurriese. Por ejemplo, en el caso del sistema de buses, un evento importante es la llegada de un bus a una parada o un semáforo. Entre estos métodos, existe un desarrollo que permite agregar variados criterios de optimización, lo que se logra mediante distintas clases o listas de reglas, entre las cuales se pueden agregar listas especializadas de prioridad para transporte público. Adicionalmente, al interior de cada una de estas listas de reglas se inserta un orden o prioridad, esto es útil cuando ocurre más de un evento considerado en una misma lista; en tal caso, sólo se toma en cuenta el de mayor prioridad, luego se simulan las acciones de mayor prioridad de cada una de las listas (Yagar & Han, 1993; Dion & Hellinga, 2002). La bondad de la solución queda entonces determinada por que tan buenas son las reglas que se impongan. Un ejemplo de lo anterior es el método denominado SPPORT (Yagar & Han, 1993), el cual no se enfoca sólo a dar prioridad al transporte público, sino a mejorar el rendimiento global. Estas metodologías evalúan varias soluciones posibles, pero implementan la que entregue un mejor índice de rendimiento.

La Ecuación (2.1) muestra un ejemplo de índice de rendimiento obtenido de (Dion & Hellinga, 2002).

$$PI = \sum_{v=1}^V \left[\sum_{n=1}^{N_v} (o_v (k_d \cdot d_n + k_s \cdot s_n + k_{TT} \cdot TT_n)) \right] + \sum_{i=1}^I (k_{TC} \cdot TC_i) \quad (2.1)$$

donde:

PI : índice de rendimiento.

V : número de tipos de vehículos.

N_v : número total de vehículos tipo v entrando a la red en un período determinado.

o_v : ocupación de un vehículo de tipo v .

k_d : importancia relativa de las demoras.

d_n : demora del vehículo n .

k_s : importancia relativa de las detenciones.

s_n : detenciones del vehículo n .

k_{TT} : importancia relativa del tiempo de viaje.

TT_n : tiempo de viaje del vehículo n .

I : número de intersecciones en la red.

k_{TC} : importancia relativa del costo terminal.

TC_i : costo terminal de intersección i .

Notar que se usa una tasa de ocupación promedio, o_v , este índice sería más útil si se contara con la información de ocupación real. Este dato podría tener una gran importancia, en especial para los buses, que son los que tienen tasas de ocupación más variables durante el día.

Se ha clasificado las estrategias, de acuerdo a la lógica de control usada. Se observa la importancia de los índices de rendimiento y de la formulación de reglas adecuadas. Corresponde ahora clasificar las estrategias de acuerdo a su alcance. Así, éstas pueden aplicarse en una intersección aislada, o sobre una red de intersecciones, donde aparecen más restricciones para su uso.

2.2.2 Clasificación por Alcance de la Estrategia.

2.2.2.1. Intersección.

En este caso sólo se toma en cuenta el funcionamiento de una intersección en forma aislada (Lee et al, 2005). Un ejemplo de esto es el método SPPORT (Yagar & Han, 1993; Dion & Hellings, 2002), el cual ejecuta modificaciones únicamente en el semáforo de la intersección que se está controlando. No obstante lo anterior, este método puede tomar como entrada el rendimiento de otras intersecciones para decidir que modificaciones realizar, lo que se aprecia en la Ecuación (2.2), donde a través de TC_i se muestra el efecto de la estrategia en la intersección i de la red.

$$TC_i = \sum_{j=1}^{N_L} \left(\frac{Q_{endj}^2}{2 \cdot q_{satj}} \cdot [U_j + \alpha_R (1 - U_j)] + Q_{endj} \cdot R_{minj} \cdot [U_j] \right) \quad (2.2)$$

donde:

TC_i : costo terminal de intersección i .

N_L : número de accesos a intersección i .

Q_{endj} : tamaño de la cola en acceso j al final de horizonte de predicción.

q_{satj} : flujo de saturación en acceso j .

U_j : señal en acceso j (0 si es verde, 1 si es rojo)

α_R : importancia relativa de un vehículo detenido en verde con respecto a uno detenido en rojo.

R_{minj} : duración mínima del rojo en acceso j .

2.2.2.2. Arteria y Red.

En este nivel se debe considerar la interacción que existe entre las distintas intersecciones que forman la red o arteria. El uso de este tipo de estrategias crea un problema, puesto que la estrategia de prioridad se aplica en una intersección y el control en este caso debe apuntar a mejorar el desempeño de un sistema de intersecciones (Duerr, 2000). Por lo anterior, se hace necesario agregar restricciones adicionales sobre la duración de verde, de manera de mantener la coordinación entre los inicios de verde que minimice las detenciones y demoras. Existen aplicaciones donde se manipulan las extensiones de los ciclos alargando o acortando fases, de manera de desplazar los inicios de verde (Wadjas & Furth, 2003); esto para asegurar la llegada de los buses durante el período de verde manteniendo la coordinación entre los semáforos de la red.

En los párrafos anteriores se ha descrito distintas estrategias y sus clasificaciones. Sin embargo, un punto importante de la modelación corresponde al tratamiento de la demanda, pues ésta afecta a los tiempos de llegada a los semáforos,

lo cual es importante debido a que la implementación de las estrategias está directamente relacionada con tales tiempos.

2.3. La Demanda de Transporte Público y Privado.

Independientemente del tipo de control que se implemente, es necesario tener algún conocimiento sobre la demanda tanto de transporte público como privado. Para el caso de estrategias pasivas, la demanda constituye un dato histórico. Sin embargo, en estrategias activas la demanda constituye una perturbación sobre el sistema, por lo tanto debe ser cuantificada en tiempo real. Más aún existe mucha literatura dedicada a algoritmos que hacen uso de predictores de demanda. Algunos de estos algoritmos usan detectores de tráfico ubicados en lugares lejanos al punto de interés (Yagar & Han, 1993), y permiten predecir el tiempo de arribo de los vehículos e incluso diferenciar entre vehículos privados y buses. En otros casos mediante un conjunto de detectores ubicados en distintos arcos se puede estimar el número de vehículos que entran a un arco, dadas las probabilidades de viraje en ese arco (Head, 1995).

La predicción de tráfico resulta sencilla si se compara con aquellas que intentan predecir la demora de los buses en los paraderos. Esta es una variable de gran interés en el control de semáforos, debido a que permite estimar los tiempos de llegada de los buses a las intersecciones semaforizadas (Kim & Rillet, 2005; Li et al, 2005; Balke et al, 2000). Este tipo de predicción ha sido ampliamente estudiado, y resulta ser un problema de alta complejidad considerando la naturaleza de las variables involucradas, tales como llegadas de los pasajeros a los paraderos e intervalo entre buses, ambas de naturaleza aleatoria.

En resumen, todos los enfoques coinciden en tomar los tiempos de espera como variables que definen el rendimiento de la intersección. Otros trabajos agregan tiempos de viaje y número de detenciones, con lo que se obtiene un índice de rendimiento más complejo, pero también más confiable. Se debe tener en cuenta además el hecho de que los buses tienen un itinerario, el cual es importante mantener.

Se desprende que la predicción de tráfico y de tiempos de espera en paraderos, son requisitos de una buena modelación, y deben ser implementados en los modelos de control. Por otra parte, los modelos basados en reglas entregan resultados satisfactorios, reduciendo tiempos de espera.

En conclusión, sería conveniente simular la implementación de una estrategia de control adaptiva, dicha estrategia debe complementarse con el uso de un esquema de reglas o restricciones que permita reducir la cantidad de opciones a simular. Adicionalmente, será necesario generar predicciones de tráfico basadas en mediciones en tiempo real. Por último deben almacenarse variables de tiempos de espera en paraderos, demoras en semáforos y largos de cola, las cuales se usarán para calcular los índices de rendimiento de cada acción de control. La estrategia propuesta en el capítulo siguiente se basará en estas condiciones.

3. Planteamiento del Problema.

En este capítulo se desarrollará una formulación analítica para el problema de control de semáforos basada en la plataforma creada en Sáez et al (2007). En dicha plataforma se simula el funcionamiento de una flota de buses en un corredor, la estrategia de control usada consiste en ejecutar acciones de control en paraderos, tales como: *holding* (retención en paraderos) y *station skipping* (salto de paraderos), dichas acciones de control permiten regular el intervalo entre pasadas de buses sucesivos en los paraderos de transporte público, con esto se pretende reducir los tiempos de espera en paraderos.

El problema que se plantea en esta memoria, al igual que en el esquema propuesto en Sáez et al (2007) busca minimizar los tiempos de espera en paraderos y demoras en semáforos, para esto se agregan más variables a la optimización, estas variables son: demoras en semáforos de los usuarios de transporte público y privado. Dicha optimización se logra mediante acciones de control en los paraderos de transporte público, lo cual se encuentra implementado en Sáez et al (2007), y agregando acciones de control sobre los semáforos de la red.

Con el fin de estimar el impacto sobre los usuarios de transporte privado se debe agregar a la formulación de Sáez et al (2007) la demanda de transporte privado. Además es necesario modificar la forma de modelación de los semáforos, de manera que sea posible realizar control sobre éstos.

La estrategia de control propuesta corresponde a una de lógica adaptiva y con alcance a nivel de arteria (o eje). Las características de estas estrategias se detallaron en los capítulos 2.2.1 y 2.2.2 respectivamente.

Primero se darán los detalles sobre la modelación de la demanda de transporte privado, luego sobre la formulación para semáforos aislados, y finalmente sobre el funcionamiento de semáforos coordinados.

3.1. Formulación del Modelo de Demanda de Transporte Privado.

El primer paso de este trabajo consiste en desarrollar una formulación de la demanda de transporte privado, de tal manera que pueda ser integrada de forma directa en la plataforma utilizada en el trabajo propuesto en Sáez et al (2007).

3.1.1. Demanda de Transporte Privado.

Para generar la demanda de transporte privado, además de los arcos ya existentes, donde circulan los buses, se requiere de arcos de entrada y salida para los vehículos privados. Por esto, a los parámetros del trabajo anterior se agregan características de la red, puesto que a pesar de que los buses se mueven en un corredor, los vehículos entran, salen y se mueven a través de arcos distintos a los que usan los buses, teniendo como origen y destino los distintos nodos de la red.

Parámetros de la red de transporte.

- V_{priv} : velocidad promedio de vehículos de transporte privado.
- N: conjunto de nodos de la red de transporte privado.
- A: conjunto de arcos de la red de transporte privado.
- M_{OD} : matriz origen destino que indica los flujos entre nodos de la red.
- R: conjunto de rutas.
- V: conjunto de vehículos en la red.

La velocidad de los vehículos de transporte privado es distinta a la de los buses por lo que debe ser especificada aparte. Sin embargo, para representar mejor los fenómenos de dispersión de pelotones se agrega una señal de ruido blanco, que permite a los vehículos adelantarse en los arcos. A su vez, esta velocidad permite generar un desfase entre semáforos de forma que funcionen de manera coordinada (Roess, 2004). Se considera también que la tasa de salida del semáforo es variable al inicio del período de verde y que se estabiliza luego de los primeros segundos (Roess, 2004).

En este caso los nodos corresponden a los semáforos y a nodos de entrada y salida que se agregaron a la red, no se consideran como nodos los paraderos, pues los vehículos privados no se detienen en éstos.

Una vez definidos los nodos, es posible definir los arcos, los cuales tienen características tales como longitud (medida en metros) y capacidad (medida en vehículos por hora). Además, los arcos se dividieron en dos categorías: los *prioritarios*, que son aquellos por donde pasan buses de transporte público, y los *no prioritarios*, por donde no pasan buses.

Para modelar el flujo de vehículos que circulan por la red se define una matriz origen destino, donde se muestra los flujos de vehículos desde los nodos de entrada hacia los de salida durante el período de simulación. La Figura 3.1 muestra la red generada, en la figura se muestran nodos, arcos y las direcciones de movimiento de los flujos de vehículos de transporte privado. Notar que la red original es circular, como se mostrará más adelante, razón por la cual la red comienza y termina en el nodo 1.

decir, con el sistema se actualiza en un intervalo de tiempo variable. En este trabajo los eventos se generan cuando un bus llega a un paradero o intersección semaforizada.

3.1.2. Predicción de Demanda de Transporte Privado.

Como se mencionó al inicio del trabajo, todos los enfoques necesitan de un cierto grado de predicción de demanda, esto es aún más importante en este caso, puesto que el control de semáforos debe integrarse a una plataforma que está construida para trabajar en forma predictiva y se basa en eventos.

En la red de trabajo es importante predecir dos datos: la entrada a la red, es decir, los tiempos en que entrarán los vehículos por cada uno de los arcos de entrada; y las rutas que tomarán los vehículos que están en la red.

Para ambos casos se propone un esquema basado en probabilidades como el que se muestra en Head, (1995).

Se describirá primero las predicciones de entrada y luego los virajes al interior de la red.

3.1.2.1. Predicción de Vehículos que Entran a la Red.

Suponiendo que se cuenta con detectores en las entradas de todos los arcos, es posible conocer la probabilidad de entrada a cada uno de estos arcos definiéndola como el número de vehículos que han entrado por el arco, dividido por el total de vehículos que han entrado a la red. Sin embargo, las mediciones de flujo definen probabilidades de entrada que son válidas sólo durante el intervalo actual k , pues mediciones posteriores pueden generar variaciones en estas probabilidades.

Dado el número de vehículos que han entrado se puede estimar la tasa de entrada de vehículos a la red. Tales vehículos se reparten entre los distintos arcos de entrada de acuerdo a la probabilidad de cada uno de estos arcos.

Estas probabilidades y tasas de entrada se pueden actualizar cada vez que se registran datos en tiempo real en la red mediante los detectores ubicados a la entrada de la red. De esta forma se define:

$$\hat{Pin}_a^{k+d} = \frac{q_a(k)}{Q_R(k)} \quad (3.2)$$

donde:

$q_a(k)$: entradas por arco a hasta instante k

$Q_R(k)$: entradas totales a la red hasta instante k

\hat{Pin}_a^{k+d} : probabilidad de entrar por arco a en instante $k+d$, $hp \geq d \geq 1$

hp : horizonte de predicción

El índice $k+d$ indica que la probabilidad de entrada no varía al interior del horizonte de predicción h_p , puesto que no se tienen nuevos datos reales, sólo datos predichos, los cuales no se usan en el cálculo de la probabilidad.

Como se conocen las probabilidades de entrada a la red por cada arco, es necesario saber el total de vehículos que entraran a la red, para asignarlos a los arcos de entrada de manera aleatoria siguiendo las probabilidades ya calculadas.

Una forma sencilla de calcular esto es la siguiente: se tiene el total de vehículos que han entrado a la red $Q_R(t)$, y el tiempo transcurrido, denominado t . Para estimar la entrada de vehículos hasta el fin del período de simulación, tiempo t_f , se calcula la tasa de entrada a la red como:

$$\hat{r}_{IN}(k+d) = \frac{Q_R(k)}{t_k} \quad (3.3)$$

Con la tasa de entrada ya calculada se estima las entradas futuras multiplicando la tasa de entrada r_{IN} por el tiempo restante hasta el final del período de simulación.

$$\hat{Q}_R(k+d) = \hat{r}_{IN}(k+d) \cdot (t_f - t_k) \quad (3.4)$$

Notar que la tasa de entrada depende del instante k actual, esto se debe a que los datos se toman en tiempo real cada vez que el sistema real se actualiza, por lo tanto, las tasas de entrada, al igual que las probabilidades pueden variar de un instante a otro, puesto que hay nuevas mediciones de por medio.

Con los datos de las probabilidades \hat{P}_{in} y las entradas totales estimadas \hat{Q}_R , se asignan los vehículos según la probabilidad de entrada por cada arco, y se distribuyen de manera uniforme en el tiempo restante de simulación.

3.1.2.2. Predicción de Virajes al Interior de la Red.

Este predictor funciona de forma semejante al anterior. Sin embargo, no se predice estrictamente la ruta, sino que se estima hacia que arco debería virar el vehículo, teniendo como datos el arco en que se encuentra y las probabilidades de viraje asociadas a ese arco.

Con los datos obtenidos de las mediciones hechas en tiempo real se puede calcular las probabilidades de viraje en cada arco con la siguiente fórmula:

$$\hat{P}_{vir}_{a1/a2}^{k+d} = \frac{q_{a1/a2}(k)}{Q_{a1}(k)} \quad (3.5)$$

donde:

$q_{a1/a2}(k)$: virajes de $a1$ hacia $a2$ hasta instante k

$Q_{a1}(k)$: entradas totales arco $a1$ hasta instante k

$\hat{P}vir_{a1/a2}^{k+d}$: probabilidad de virar desde $a1$ hacia $a2$ hasta instante $k + d$, $hp \geq d \geq 1$

hp : horizonte de predicción

Esta probabilidad también depende del tiempo pues se actualiza a medida que se tienen más datos. Estas probabilidades definen intervalos entre 0 y 1. De esta forma a cada vehículo que deja un arco se le aplica una variable aleatoria entre 0 y 1, el arco siguiente se decide dependiendo del intervalo en que se encuentra esta variable, es claro que los arcos con mayor probabilidad de ser usados generan intervalos más grandes.

3.1.2.3. Ajustes a la Predicción.

Como se mencionó al inicio de la Sección 3.1.2, este predictor se integra en una plataforma de simulación basada en eventos, esto genera la posibilidad de guardar la información de demanda obtenida desde el inicio de la simulación hasta el evento actual.

Calcular la probabilidad usando todos los datos, incluyendo los que se han medido mucho tiempo atrás, hace que la información más reciente pierda importancia, puesto que se tiene un conjunto de datos grande que se ha ido acumulando durante la simulación, pero el total de datos nuevos es pequeño en comparación al conjunto total, es decir, no se perciben de forma significativa los datos nuevos. A causa de esto se puede perder de vista situaciones particulares de ciertos instantes.

El efecto de la agregación puede disminuirse, para esto se pueden calcular las probabilidades basándose en los datos más recientes. Aquí está la importancia de tener un registro de la demanda por evento, puesto que de esta forma es posible separar los eventos recientes del resto.

Supóngase que en el registro se guardan los vehículos que han cruzado un detector hasta el instante actual. Sin embargo, del total de vehículos contados sólo un subconjunto corresponde a eventos recientes en la red. Si al total registrado hasta el evento actual se le resta el registro que se tenía en algún evento anterior, se tendrá la demanda entre esos dos eventos, es decir los autos que han cruzado desde el evento anterior hasta el actual. Tal evento anterior está definido por el número de eventos hacia atrás a observar, este número es un parámetro que debe ser elegido por el controlador, por ejemplo, si se ajusta en el valor 3, entonces las probabilidades se calculan tomando en cuenta los datos registrados durante los tres últimos eventos. Analíticamente esto queda así:

$$\bar{q}(k) = q(k) - q(k - ho) \quad (3.6)$$

donde:

$\bar{q}(k)$: flujo ajustado en el tiempo asociado al instante k .

$q(k)$: flujo total registrado hasta el tiempo asociado al instante k .

ho : número de eventos recientes a observar, horizonte de observación.

La fórmula (3.6) se debe aplicar de la misma forma para ajustar el flujo Q de la Ecuación (3.2) y (3.5). La Figura 3.2 muestra un esquema del movimiento del horizonte de observación y de predicción a medida que se generan nuevos eventos, notar que el horizonte de observación y de predicción no son iguales, además es posible apreciar que los datos usados para calcular las probabilidades son los que se encuentran dentro del horizonte de observación, que en la figura está representado por ho , los datos anteriores ya no se usan. Por simplicidad se muestran todos los eventos con la misma duración, recordar que los intervalos tienen distinta duración, y que dicha duración depende de la ocurrencia de eventos. Se observa que a medida que se avanza en la simulación, tanto el horizonte de predicción como el de observación se desplazan, esto es lo que se denomina *rolling horizon* (horizonte móvil).

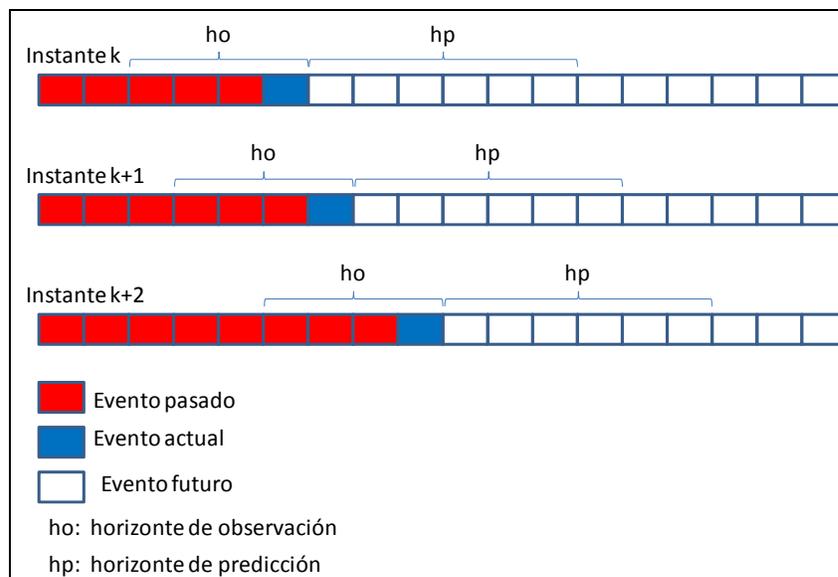


Figura 3.2. Horizonte de predicción y de observación durante simulación.

Fuente: Elaboración propia.

3.2. Formulación del Problema de Control para un Semáforo Aislado.

Uno de los objetivos de este trabajo es formular el problema de control para semáforos de prioridad aislados, en este caso cada semáforo es controlado de forma independiente.

3.2.1. Esquema de Control Predictivo Híbrido.

Parte del esquema está basado en el trabajo mostrado en Sáez et al (2007), en dicho trabajo se formula y resuelve el problema de control usando estrategias en paraderos.

Sin embargo, al integrar nuevas estrategias aparecen nuevas variables que afectan la dinámica del sistema, tales como la presencia de vehículos de transporte privado y repartos de semáforos que pueden variar en el tiempo, esto último producto de las mismas acciones de control que se ejecuten sobre los semáforos.

Una de las características de este trabajo es que los instantes son definidos por la ocurrencia de eventos relevantes, en este caso, la llegada de buses a los paraderos, por lo tanto, no se establece un paso a priori.

Las decisiones sobre estrategias en paraderos se toman cuando el bus llega a tal paradero. Por lo tanto, se podría pensar que las acciones de control sobre semáforos se toman cuando los buses llegan al semáforo en cuestión. Sin embargo, esto podría no ser óptimo.

Para justificar lo anterior se muestra un ejemplo: Supóngase que un bus sale de un paradero en un tiempo tal que se le considera atrasado. Suponiendo que aguas abajo hay un semáforo, sería conveniente que cuando el bus llegase a tal semáforo éste estuviese en verde. En tal caso, si la decisión se tomara en el semáforo, el bus podría llegar en rojo, y la decisión de pasar a verde se tomaría cuando el bus ya estuviese detenido en el semáforo, y por lo tanto, aún más retrasado.

Por lo anterior, es conveniente tomar la decisión antes de llegar al semáforo, en este caso la decisión se tomará en el paradero (o semáforo) asociado al evento inmediatamente anterior a un evento en semáforo, se pueden realizar acciones de control en semáforos cuando se estime que el siguiente bus que genere un evento lo hará en un semáforo. En la Figura 3.3, el caso 1 muestra una situación en que el siguiente bus que genere evento lo hará en paradero, puesto que la distancia L_1 es menor que L_2 y la velocidad de los buses es la misma, por lo tanto, el bus de la derecha llegará primero a su destino, generando un evento en el paradero. En el caso 2 en cambio L_2 es menor por lo tanto el evento ocurrirá en el semáforo, en tal caso si es posible ejecutar alguna acción de control sobre el semáforo. Notar que el bus que generó el instante k , no es necesariamente ninguno de los buses mostrados en la Figura 3.3.

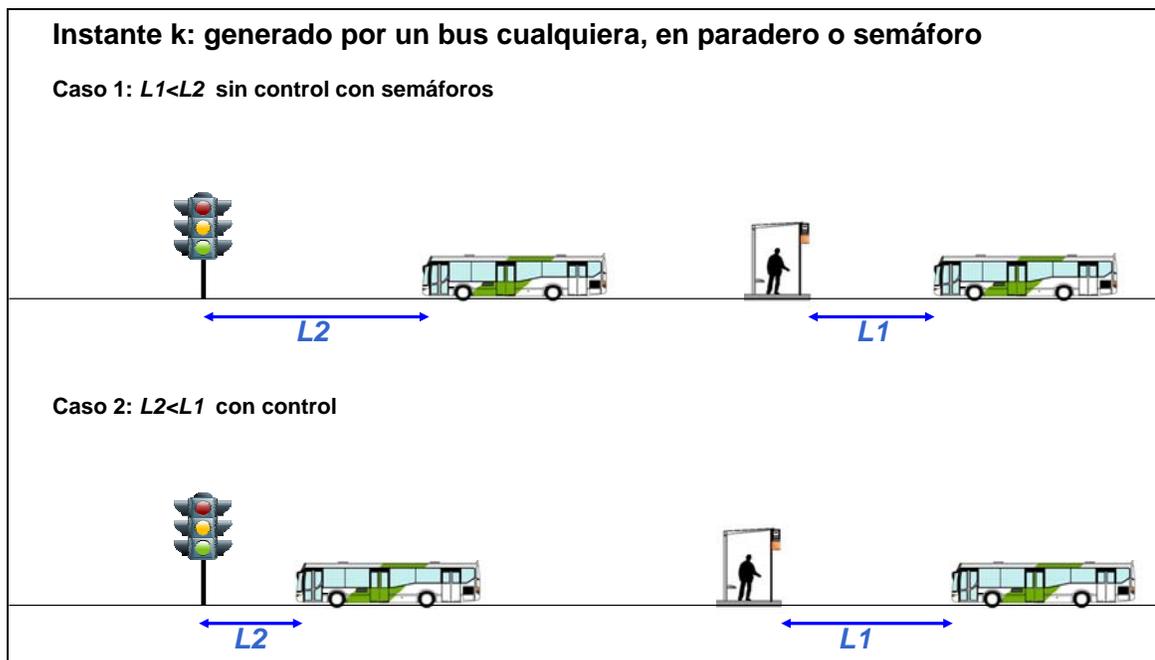


Figura 3.3. Ejemplo de control con semáforos.
Fuente: Elaboración propia.

En la práctica, cuando se realiza control sobre los semáforos no se afecta sólo a los buses, sino también a los usuarios de transporte privado que comparten la vía y a los que la cruzan; por lo tanto, en este trabajo se agrega como variable los tiempos de espera de tales usuarios. Además, se agrega un conjunto de parámetros que describen el funcionamiento de los semáforos. A continuación se especifica analíticamente el problema estudiado.

Parámetros del Sistema de Semáforos.

- S: número de semáforos
- C: ciclo de los semáforos.
- V_{priv} : velocidad promedio de vehículos de transporte privado.
- Offset: desfase entre semáforos del corredor.
- Repartos de verde por intersección.

A continuación se entrega un listado con las variables involucradas en el sistema y el esquema de control que las relaciona en la Figura 3.4.

Variables de estado.

- $\hat{X}_i^b(t)$: posición del bus i en cualquier instante continuo t.
- $\hat{T}_i^b(t)$: tiempo que falta para que bus i llegue al próximo paradero o semáforo.
- $\hat{X}_j^a(k)$: ubicación relativa de los vehículos en el arco J en instante k.
- $\hat{G}_s(k)$: estado del semáforo S en instante k.
- $\hat{Q}_A(k)$: largo de cola en arco A en instante k.

Acciones de control.

- $Su_i(k-1)$: acción de control sobre el bus i en el instante k correspondiente a la activación de la transferencia de pasajeros.
- $h_i(k-1)$: acción de control sobre el bus i en el instante k correspondiente a la retención en el paradero correspondiente, tal detención puede tomar valores discretos de 30, 60 o 90 [s].
- $Lc_s(k-1)$: acción de control sobre semáforo s en ciclo asociado a tiempo t_k , módulo indica el ciclo, si es positivo se realiza una extensión de verde, si es negativo un adelantamiento, de 15 o 30 [s].

Variabes de Salida.

- $\hat{L}_i(k+l)$: carga de pasajeros en bus i en instante $k+l$
- $\hat{T}d_i(k+l)$: tiempo de salida del bus en instante $k+l$.
- $\hat{T}s_i(k+l)$: demora de vehículo i (auto o bus) en instante k .

Tomando en cuenta estas variables el esquema de control es el siguiente:

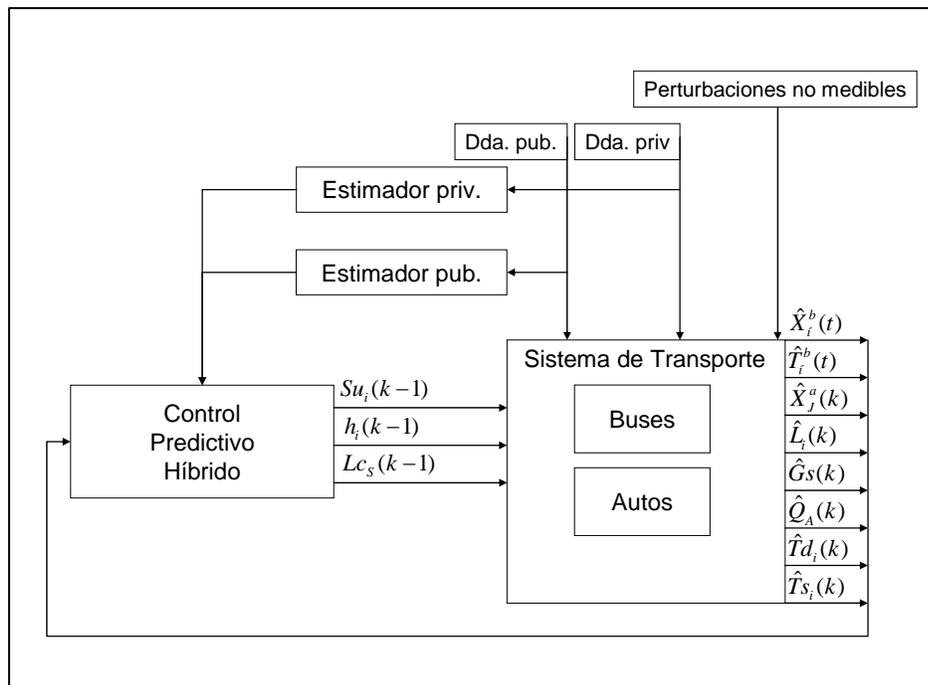


Figura 3.4. Esquema de control con semáforos.
Fuente: Elaboración propia.

A diferencia de lo propuesto en Sáez et al (2007) en este trabajo se considera como parte del sistema de transporte a los vehículos privados y no sólo a los buses.

En la Figura 3.4, las acciones control son representadas por $Lc_s(k-1)$, éste indica que acción de control se debe ejecutar en el semáforo S y a que ciclo se asocia esta acción de control. En la Figura 3.5 se muestra un diagrama de cómo se asocian los tiempos de simulación, es decir la hora, con los ciclos del semáforo.

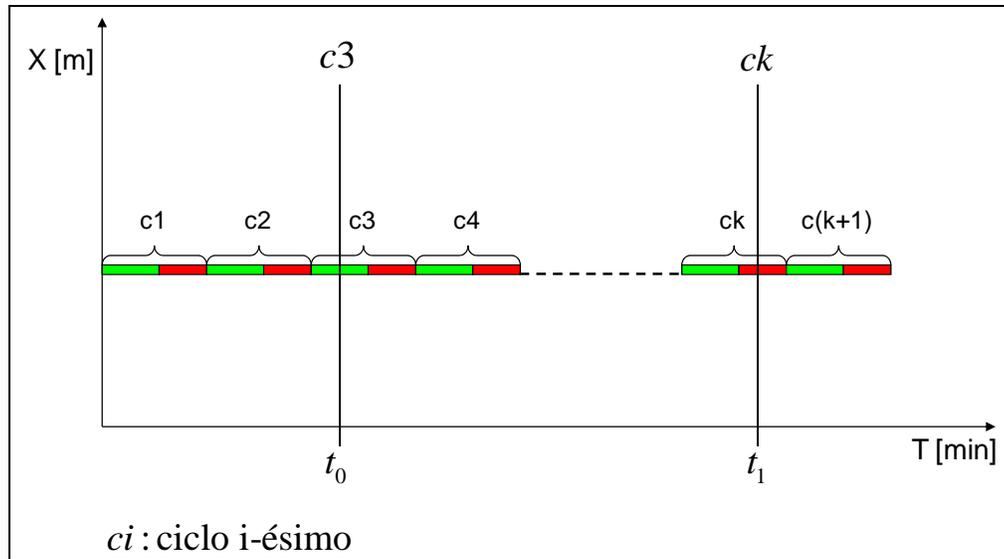


Figura 3.5. Asociación de ciclos y tiempos.
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3.5, t_0 está asociado con c_3 y t_1 con c_k , es decir, cualquier instante de tiempo que se encuentre dentro de alguna de las fases de un ciclo determinado está asociado a ese ciclo.

$$Lc_S(k-1) = \begin{cases} c_{t_k}(k-1) & \text{si se ejecuta } ge(c_k) \text{ en semáforo } S \\ -c_{t_k}(k-1) & \text{si se ejecuta } eg(c_k) \text{ en semáforo } S \\ 0 & \text{si no se ejecuta ninguna acción de control en semáforo} \end{cases} \quad (3.7)$$

El término $c_{t_k}(k-1)$ nos indica que acción de control ejecutar en el ciclo asociado a t_k , extensión de verde o adelantamiento de verde, un signo negativo indica que se debe adelantar el verde, como se muestra en la Figura 2.3, en cambio un signo positivo indica una extensión de verde como la de la Figura 2.2, y el valor absoluto de este término indica en que ciclo se debe ejecutar la acción de control. Por ejemplo: $Lc_S(k-1) = -30$ indica que en el ciclo 30 se debe hacer un adelantamiento del verde de ese ciclo.

La decisión de hacer adelantamiento o extensión depende de ciertas restricciones relacionadas con el tiempo estimado de llegada del bus al semáforo t_k :

- Si el semáforo está en verde en el instante k , entonces, no hay acción de control en semáforos
- Si en el instante k el tiempo restante para que el semáforo cambie a fase verde es menor a al valor umbral, entonces sólo evaluar adelantamiento de verde.
- Si en el instante k el tiempo restante para que el semáforo cambie a fase rojo es menor a un valor umbral, entonces sólo evaluar extensión de verde.

El valor umbral es uno de los parámetros de control que deben ajustarse, notar que a mayor valor umbral hay más probabilidades de ejecutar acción de control. Estas restricciones ayudan a reducir el número de acciones de control posibles.

Ya se ha definido como decidir entre las distintas acciones de control; falta indicar en que ciclo deben actuar tales acciones, este ciclo es fácil de calcular si se cuenta con el tiempo t_k , asociado mediante la siguiente ecuación:

$$c_{t_k}(k-1) = \left\lfloor \frac{t_k - Offset}{C} \right\rfloor + 1 \quad (3.8)$$

donde:

Offset : es el desfase entre semáforos

Como se mencionó anteriormente, la decisión sobre que acciones de control a ejecutar en el semáforo se debe tomar antes de llegar al lugar físico de la intersección semaforizada. Sin embargo, esto requiere predecir el tiempo en que llegará el bus al semáforo, lo cual ya se encuentra implementado en el trabajo de Sáez et al (2007). No obstante lo anterior, y como se muestra en la Figura 3.4, se requieren predictores de transporte privado, pues la introducción vehículos privados hace necesario tener conocimiento de los tiempos de llegada de éstos a las intersecciones semaforizadas, pues estos vehículos también influyen cuando se decide la acción de control a ejecutar Yagar & Han, (1993).

A continuación se describe las variables de estado del esquema de control. La posición del bus i en un tiempo t cualquiera y de un auto en un instante k se pueden escribir como:

$$X_i^b(t) = X_i^b(t_k) + \int_{t_k}^t v_i^b(\mathcal{G}) d\mathcal{G} \quad (3.9)$$

$$X_i^a(k) = X_i^a(k-1) + \sum_{j=k-1}^k v_i^a(j)(t_j - t_{j-1}) \quad (3.10)$$

donde:

$v_i^a(t)$: velocidad del bus i en instante t

$v_i^a(k)$: velocidad del auto i en instante k

Un supuesto de este trabajo es que la velocidad en arco se mantiene constante para los buses. Sin embargo, para los vehículos de transporte privado además de tener una velocidad mayor, la velocidad podrá ser afectada mediante una señal de ruido blanco, dicha señal, de ser agregada, permitiría velocidades distintas entre distintos vehículos y en distintos instantes de tiempo.

Como se mencionó antes, con el objeto de permitir coordinación entre los semáforos, se agregó entre estos un tiempo de desfase. Este tiempo corresponde a la diferencia que existe entre los inicios del verde de dos semáforos; esta diferencia

permite que un vehículo que alcanza a descargarse en el tiempo de verde de un semáforo pueda llegar al siguiente semáforo de aguas abajo antes de que se fase entre en estado rojo. Se calcula como sigue:

$$Offset = \frac{V_{priv}}{d} \quad (3.11)$$

donde:

d : corresponde a la distancia entre semáforos

Si bien la velocidad en arco se considera constante, hay que tomar en cuenta que los vehículos privados se detienen en los semáforos, y que los buses se detienen en los semáforos y paraderos, por lo tanto, se debe proporcionar una formulación para la velocidad que permita modificar esta velocidad para tales casos, esto se muestra en la Ecuación (3.12).

$$v_i(t) = \begin{cases} 0 & \text{si está en paradero o semáforo} \\ v_0 & \text{si está en movimiento} \end{cases} \quad (3.12)$$

En el caso de que el bus se encuentre con un paradero, la velocidad varía como se muestra en la Figura 3.6. Este es un caso en el que no se realiza *station skipping*, es decir, el bus sí se detiene en el paradero, en caso contrario la velocidad se mantendría en v_0 .

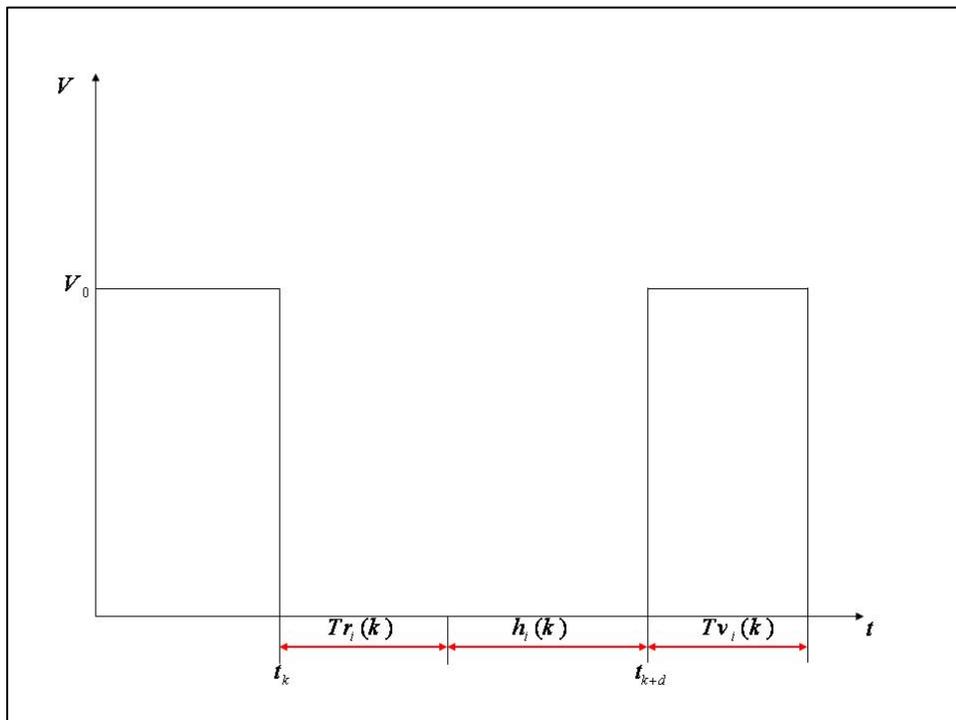


Figura 3.6. Velocidad de un bus cuando hay un paradero en el arco.
Fuente: Elaboración propia.

$Tr_i(k)$: tiempo de transferencia de pasajeros

$h_i(k)$: tiempo de duración de holding

$Tv_i(k)$: tiempo de viaje al siguiente paradero o semáforo

Ahora, en caso de que se encuentre un semáforo en el arco, la velocidad varía como se indica en la Figura 3.7. Al igual que en el caso anterior, el tiempo de detención puede ser cero, si es que el bus o vehículo privado llega al semáforo cuando éste se encuentra en verde.

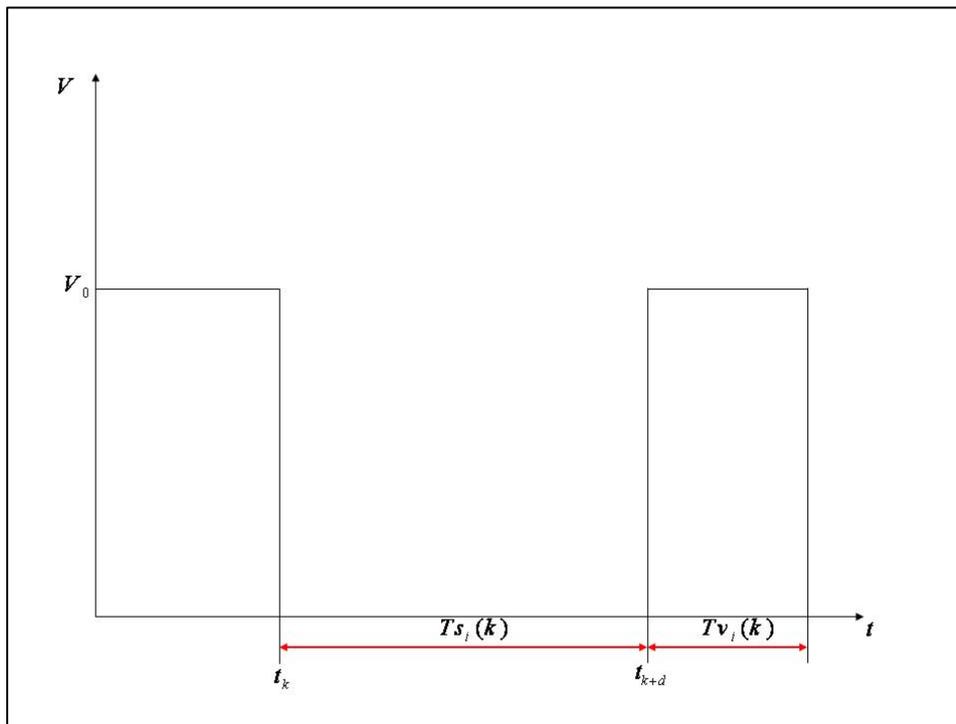


Figura 3.7. Velocidad de un bus cuando hay un semáforo en el arco.

Fuente: Elaboración propia.

$Ts_i(k)$: tiempo de detención en el semáforo en instante k

$Tv_i(k)$: tiempo de viaje al siguiente paradero o semáforo en instante k

Basándose en estos esquemas, se puede definir analíticamente el tiempo que falta para que un bus, o vehículo privado llegue al próximo paradero o semáforo, es decir, para que se genere el próximo evento.

En el caso de paraderos:

$$T_i^b(t) = t_k + h_i(k) + Tr_i(k) + Tv_i(k) - t \quad t_k \leq t \leq t_{k+d} \quad (3.13)$$

En el caso de semáforos:

$$T_i^b(t) = t_k + Ts_i(k) + Tv_i(k) - t \quad t_k \leq t \leq t_{k+d} \quad (3.14)$$

El estado del semáforo $G_s(k)$ depende de las acciones de control que se realicen sobre éste; en este caso se define el estado del semáforo con dos variables, la primera componente corresponde a la fase que se está sirviendo actualmente (verde significa fase prioritaria y rojo fase no prioritaria) y la segunda componente corresponde al tiempo que falta para que se produzca cambio de fase.

$$G_s(k) = [VR_s(t_k), Ts(t_k)] \quad (3.15)$$

donde:

$VR_s(t_k)$: 1 si semáforo s está en verde en k o si está en rojo

$Ts(t_k)$: tiempo para que cambie a verde si está en rojo en k , 0 si está en verde

Los semáforos tienen una programación prefijada, que está activa cuando no se han ejecutado acciones de control en el semáforo. A continuación se muestra como calcular $VR_s^0(t_k)$ y $Ts^0(t_k)$ cuando no se han ejecutado acciones de control, es decir G_s^0 , el caso con acciones de control se mostrará después.

Cada semáforo tiene un tiempo de verde predefinido VR_0 , además se conoce el tiempo de ciclo de los semáforos C .

La naturaleza cíclica de la programación del semáforo hace posible modelar su estado mediante la función escalón de *Heavyside*.

$$Heav(\theta) = \begin{cases} 1 & \text{si } x \geq 0 \\ 0 & \text{si } x < 0 \end{cases} \quad (3.16)$$

La Ecuación (3.16) muestra un escalón centrado en cero. Sin embargo, sumando una secuencia de estas funciones centradas en los tiempos de inicio de y restando otra secuencia centrada en los tiempos de fin de verde se puede obtener una función como la mostrada en la Figura 3.8, esto se puede expresar analíticamente como sigue:

$$VR_s^0(t_k) = \sum_{i=1}^{N_c} [Heav(t_k - C \cdot (i-1)) - Heav(t_k - C \cdot (1-\alpha) \cdot i)] \quad (3.17)$$

donde:

$$\alpha = \frac{VR_0}{C} \quad (3.18)$$

N_c : número de ciclos

La Ecuación (3.17) entrega el estado del semáforo en cualquier instante t_k , y tiene la forma que se muestra en la Figura 3.8.

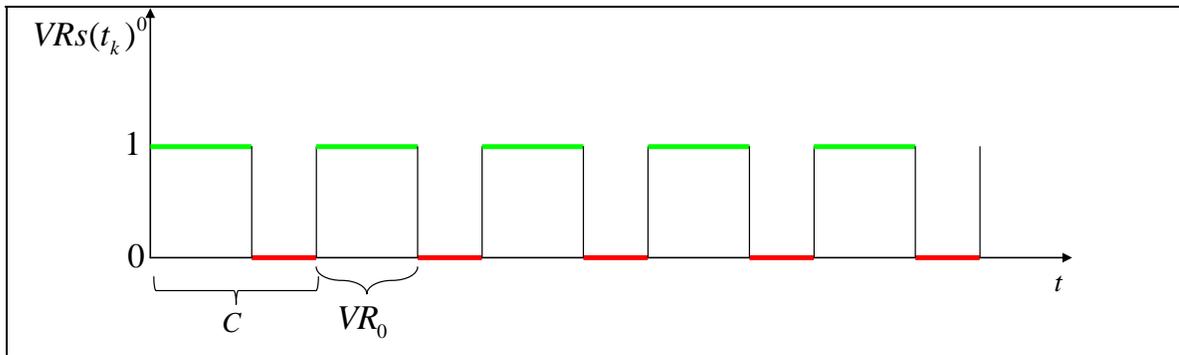


Figura 3.8. Estado del semáforo sin control.

Fuente: Elaboración propia.

Se ha establecido el estado del semáforo en función del tiempo, ahora sólo se requiere saber cuanto tiempo falta para que cambie a verde. Esto puede resultar un poco más complejo puesto que no es posible despejar la variable t en la función escalón.

Por lo tanto, $Ts^0(t_k)$ se define como:

$$Ts(t_k) = \text{Min} \{ \Delta t : VRs^0(t_k + \Delta t) = 1 \} \quad (3.19)$$

En esta ecuación se indica cuanto falta para pasar al valor 1 en la función de estado del semáforo, que significa semáforo en verde. Como se puede observar en la Figura 3.9, en cualquier instante t se puede encontrar un $\Delta t \geq 0$, tal que la función de estado evaluada en $t + \Delta t$ tenga valor 1. Sin embargo, existen muchos Δt que pueden cumplir con esto, aplicando la función mínimo se encuentra el Δt más cercano.

Notar que la Ecuación (3.19) es válida también si el semáforo está en verde, puesto que en ese caso $\Delta t = 0$, es decir, no hay que esperar para que el semáforo cambie a fase verde.

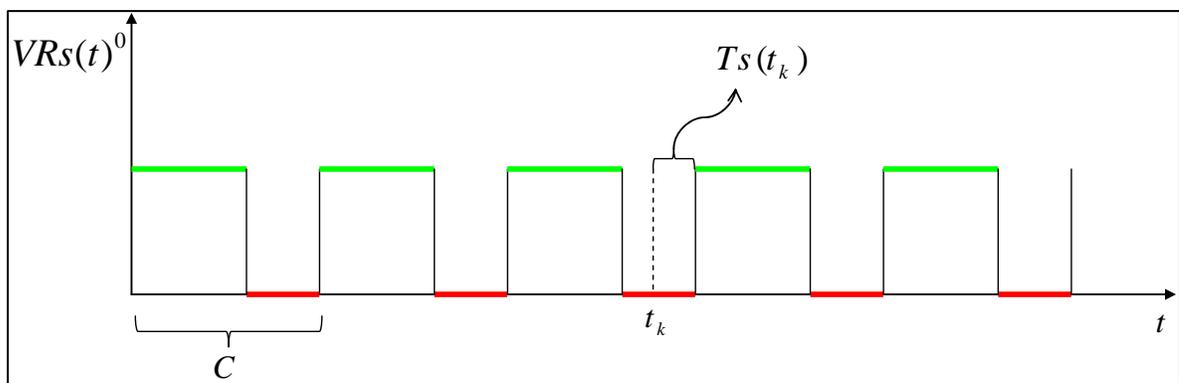


Figura 3.9. Tiempo faltante para fase verde.

Fuente: Elaboración propia.

De la Ecuación (3.14) se desprende que $Ts_i(k)$ corresponde a la demora en semáforos, para el bus o auto i en el instante k . Sin embargo, la expresión de esta demora es distinta para buses y autos.

Se muestra primero el caso de un bus que llega a un semáforo en el instante k . En este caso la demora depende sólo del estado del semáforo. Si el bus llega al semáforo en verde, simplemente pasa y no espera. Si llega en rojo debe esperar hasta que empiece el siguiente verde.

$$Ts_i(k) = Ts(t_k) \quad (3.20)$$

En el caso de los autos, el tiempo de espera no es igual a de $Ts(t_k)$. Los autos se acumulan en colas durante el rojo, por lo tanto, para salir del arco deben esperar a que los vehículos que les preceden salgan de la cola.

Los casos en que el auto llega al semáforo en fase verde o está sólo en la fila son análogos al de caso de la Ecuación (3.20). Se requiere entonces revisar el caso de un auto ubicado en la posición n de la cola.

Supóngase que tenemos un total de N autos en cola, y que el total de vehículos que se pueden descargar durante el verde es N^0 . En algunas ocasiones se tendrá que $N \geq N^0$, es decir, no podrán salir todos los autos y algunos tendrán que esperar al siguiente período de verde, por lo tanto, en el siguiente verde, a cada uno de los vehículos v que no salieron se les debe agregar el tiempo que llevaban esperando, llamémoslo Tm_v^k donde k corresponde al intervalo en que se acumuló esa demora. De esta forma:

$$Tm_v^k = Tm_v^{k-1} + C \quad (3.21)$$

Donde:

C : tiempo de ciclo del semáforo

Tm_v^{k-1} : espera en el ciclo anterior del semáforo

Notar que se agrega un ciclo más a la espera, puesto que si no alcanza a pasar en esta fase entonces debe esperar al próximo verde para intentar pasar de nuevo.

Ahora, si el vehículo alcanza a pasar, debe esperar a que salgan los vehículos que le preceden en la cola. A cada uno de los vehículos que pasen le tomará un tiempo desde que sale el vehículo inmediatamente anterior hasta que comienza a moverse, eso sin considerar que los vehículos deben mantener una distancia prudente entre si, para evitar colisiones. A lo anterior hay que agregar que la reacción de los conductores no es automática cuando empieza el tiempo de verde; por lo general a los primeros vehículos que pasan les toma un poco más de tiempo; este tiempo disminuye vehículo a vehículo hasta llegar a una tasa constante. Dicha tasa se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$h = \frac{3600}{Q_{sat}} \quad (3.22)$$

donde:

h : intervalo de saturación [s/veh]

Q_{sat} : flujo de saturación [veh/h/pista]

En la Figura 3.10 se muestra como a los primeros autos en salir de la cola tienen un desfase mayor al de los que los siguen, desfase que sigue disminuyendo, hasta que alcanza un valor estable de aproximadamente $h = 2[s/veh]$.

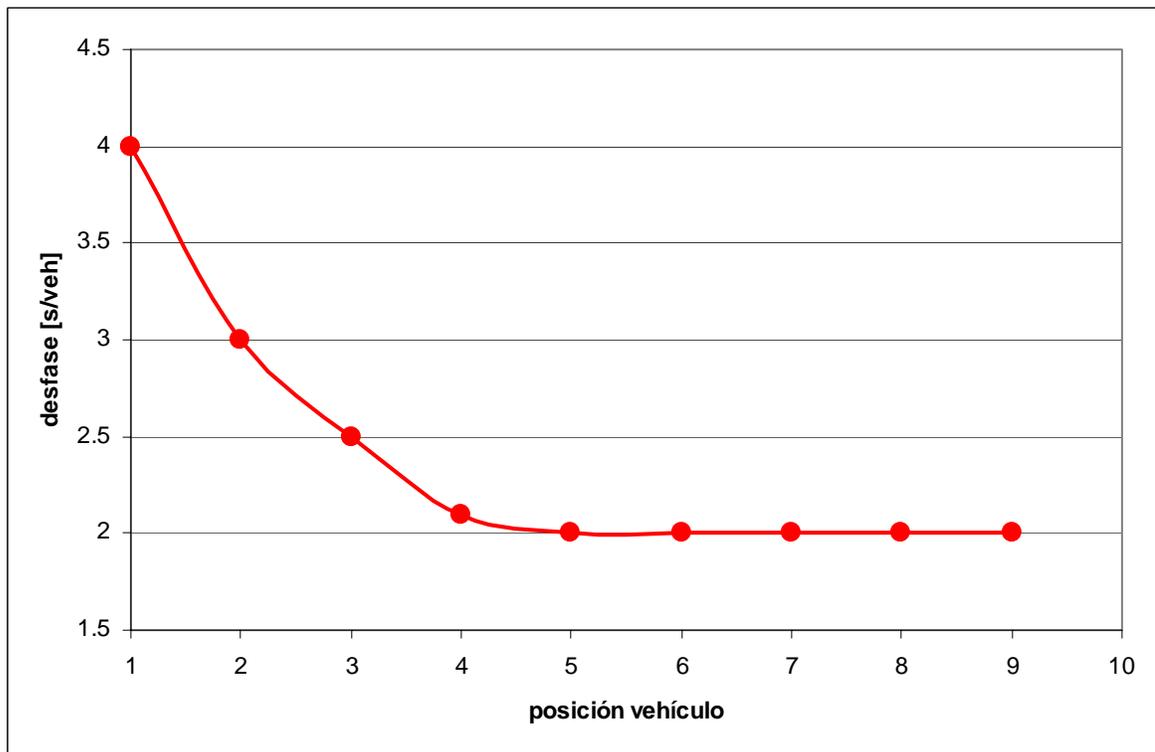


Figura 3.10. Desfase entre vehículos en semáforos.

Fuente: Elaboración propia.

Si se denomina $\Delta(n)$ al desfase de la Figura 3.10 asociado al vehículo n , entonces el tiempo de espera de un vehículo en cola puede calcularse como:

$$Ts_n(k) = Ts(t_k) + Tm_n^k + \sum_{i=1}^n \Delta_i \quad \forall n \leq N^0 \quad (3.23)$$

Sólo queda definir de forma analítica el estado del semáforo $G_s(k)$. Dicho estado depende de la programación del semáforo y de las acciones de control que se ejecuten sobre éste. La parte que depende de la programación se ha denominado G_s^0 .

A continuación se definen las acciones de control y como éstas afectan a la programación predefinida del semáforo. Como la programación del semáforo fue definida mediante funciones escalón es conveniente describir las acciones de control de la misma forma. Las acciones de control que se hagan sobre el semáforo pueden afectar a los vehículos que usan el semáforo entre el momento en que se decide ejecutarla hasta que ha terminado el ciclo en que se realizó esta acción de control. Esto quiere decir que un vehículo no es afectado por una acción de control, sino que por el conjunto de todas las acciones que se han ejecutado, por lo tanto, es necesario guardarlas almacenarlas eficientemente. Se define la función:

$$u(t) = \sum_{\lambda=1}^k u(\lambda) \quad (3.24)$$

La función en (3.24) está definida en tiempo continuo, al igual que el estado del semáforo, pero depende de acciones de control $u(\lambda)$ asociadas al evento λ . Recordemos que las acciones de control están asociadas a un ciclo, el cual se puede calcular mediante la Ecuación (3.8). Dependiendo de que tipo de acción de control se trate, $u(\lambda)$ tendrá una expresión diferente, puesto que las extensiones de verde se ejecutan al final del verde, y los adelantamientos al inicio, los cuales no necesariamente corresponden al tiempo t_λ asociado al evento λ . Análíticamente se tiene:

$$u(\lambda-1) = \begin{cases} Heav(t - \tilde{t}_\lambda) + Heav(t - \tilde{t}_\lambda - gg) & \text{si } Lc_s(\lambda-1) > 0 \\ Heav(t - (\tilde{t}_\lambda - gg)) + Heav(t - \tilde{t}_\lambda) & \text{si } Lc_s(\lambda-1) < 0 \\ 0 & \text{si } Lc_s(\lambda-1) = 0 \end{cases} \quad (3.25)$$

En la Ecuación (3.25) aparecen los términos \tilde{t}_λ , los cuales corresponden al tiempo en que se ejecuta la acción de control. Éstos \tilde{t}_λ se relacionan con t_λ de la siguiente forma:

$$\tilde{t}_\lambda = \begin{cases} t_\lambda - \text{Min}\{\Delta t : VR(t_\lambda - \Delta t) = 1\} & \text{si } Lc_s(\lambda-1) > 0 \\ t_\lambda + \text{Min}\{\Delta t : VR(t_\lambda + \Delta t) = 1\} & \text{si } Lc_s(\lambda-1) < 0 \end{cases} \quad (3.26)$$

Como se mencionó anteriormente, las acciones de control se toman cuando el predictor dice que el bus llegará al siguiente semáforo cuando éste esté en fase roja. Por lo tanto cuando se ejecuta una extensión de verde, es decir, $Lc_s(\lambda-1) > 0$, se debe buscar hacia atrás, partiendo desde el tiempo de llegada al semáforo que se obtuvo del predictor, hasta el instante de tiempo en que finalizó la fase verde inmediatamente anterior y extender dicho tiempo, de manera que la fase verde termine después de lo predicho. Caso contrario, si $Lc_s(\lambda-1) < 0$, se debe buscar hacia delante, a partir de la tiempo de llegada al semáforo predicho por el bus, para encontrar el inicio de la siguiente fase verde y adelantarlo, de manera que la fase verde comience antes de lo predicho. En la Ecuación (3.25) gg corresponde al tamaño de la modificación en tiempo que se ejecutará. La forma que adquiere la función $u(t)$ se muestra en la Figura 3.11.

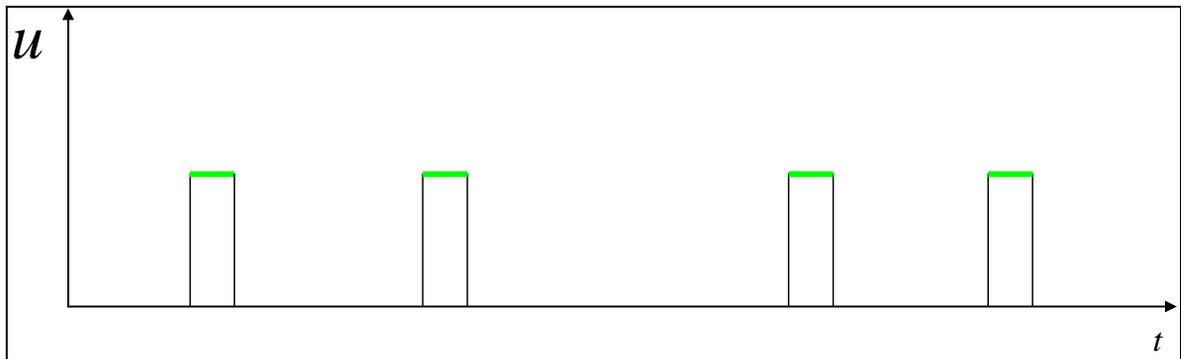


Figura 3.11. Acciones de control ejecutadas expresadas en tiempo continuo.
Fuente: Elaboración propia.

La Figura 3.11 muestra sólo las extensiones y adelantamientos realizados. Con $u(t)$ y $VRs^0(t)$ se puede definir el estado resultante $VR(t)$ como la suma de estos dos términos:

$$VRs(t) = VRs^0(t) + u(t) \quad (3.27)$$

Graficando la Ecuación (3.27) se obtiene lo siguiente, una función de estado donde las duraciones del verde y rojo ya no son fijas, sino que dependen de las acciones de control, tal como se observa en la Figura 3.12.

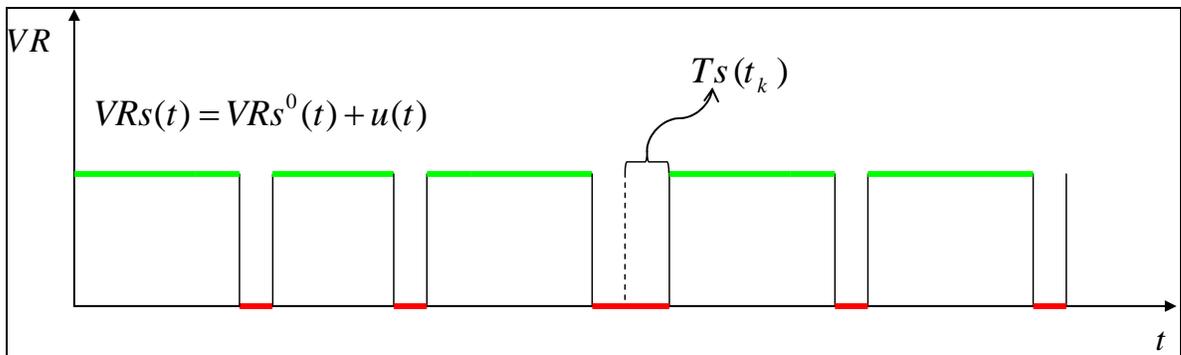


Figura 3.12. Estado del semáforo en todo tiempo.
Fuente: Elaboración propia.

Hay que notar que en este caso, $Ts(k)$ se puede obtener aplicando la misma Ecuación (3.19), con lo que se definen las variables $VRs(t)$ y $Ts(t)$, las dos variables que explican el estado del semáforo.

Modificar el tiempo de verde trae como consecuencia que ahora pueden cruzar más autos, puesto que el verde es más largo. Con esto se puede computar un nuevo \bar{N}^0 como sigue:

$$\bar{N}^0 = N^0 + gg \cdot r \quad (3.28)$$

donde:

r : tasa de salida de vehículos [veh/s]

$$r = \frac{1}{\Delta} \quad (3.29)$$

En el caso anterior todos los vehículos en cola esperan menos, puesto que el verde comienza antes. Si se decide extender el verde el efecto es distinto, en tal caso los que se benefician de la acción son los vehículos que no habrían alcanzado a pasar sin la extensión del verde. Esto quiere decir que $T_s(t_k)$ no se modifica, sólo aumenta el número de vehículos que pueden pasar.

$$\bar{N}^0 = N^0 + gg \cdot r \quad (3.30)$$

donde:

gg : corresponde a la cantidad de tiempo en que se extiende o adelanta el verde

Las ecuaciones anteriores describen el efecto de los semáforos y sus acciones de control sobre los vehículos que viajan paralelamente a los buses, es decir, en la vía prioritaria.

Sin embargo, para los vehículos que están en las vías no prioritarias las acciones de control tienen el efecto contrario. En las vías no prioritarias se producen aumentos en las demoras producto de las acciones de control. Por lo tanto, si se hace un adelantamiento de verde, los autos de la vía no prioritaria ven que su período de verde termina antes, así que se reduce el número de autos que pueden salir. Es decir:

$$\bar{N}^0 = N^0 - gg \cdot r \quad (3.31)$$

En caso que se haga una extensión de verde, también disminuye el número de vehículos que pueden salir; además en este caso, el verde tarda más en comenzar, por lo que aumenta el término $T_s(t)$ para esta fase. Analíticamente:

$$\bar{N}^0 = N^0 - gg \cdot r \quad (3.32)$$

El estado de los semáforos para las vías no prioritarias se puede definir a partir del estado de la vía prioritaria, puesto que cuando la vía prioritaria está en fase verde la vía no prioritaria necesariamente está en fase rojo, se define $VR_s^{NP}(t)$ como el estado del semáforo en la vía no prioritaria.

$$VR_s^{NP}(t) = 1 - VR_s(t) \quad (3.33)$$

3.2.2. Función Objetivo.

El trabajo de Sáez et al (2007) no incluye semáforos, siendo la función objetivo a evaluar la siguiente:

$$\begin{aligned} \underset{\{u(k), \dots, u(k+Np-1)\}}{\text{Min}} \quad J = \sum_{\ell=1}^{Np} & \left[\theta_1 \cdot \hat{H}_i(k+\ell) \hat{\Gamma}(k+\ell) + \theta_2 \cdot (\hat{H}_i(k+\ell) - \bar{H})^2 \right. \\ & \left. + \theta_3 \cdot \hat{L}_i(k+\ell) h_i(k+\ell-1) + \theta_4 \cdot \hat{\Gamma}(k+\ell) \hat{H}_{i+1}(k+\ell+z) (1 - Su_i(k+\ell-1)) \right] \Big|_{i=i(k+\ell)} \end{aligned} \quad (3.34)$$

La Ecuación (3.34) consta de 4 términos importantes:

- $\hat{H}_i(k+\ell) \hat{\Gamma}(k+\ell)$: corresponde al tiempo de espera estimado de los usuarios en los paraderos de transporte público.
- $(\hat{H}_i(k+\ell) - \bar{H})^2$: este término mide la diferencia entre el intervalo estimado de pasadas de buses efectivo con el intervalo deseado \bar{H} .
- $\hat{L}_i(k+\ell) h_i(k+\ell-1)$: este término mide los tiempos de espera estimados a bordo de los buses que hacen *holding*, puesto que los usuarios de éstos buses sufren tiempos de espera adicionales abordo del bus.
- $\hat{\Gamma}(k+\ell) \hat{H}_{i+1}(k+\ell+z) (1 - Su_i(k+\ell-1))$: finalmente, este término mide los tiempos de espera estimados para los usuarios que deben esperar tiempo extra en el paradero cuando un bus hace *station skipping*.

Los parámetros θ que acompañan a cada uno de estos términos corresponden a la importancia relativa que se le dará a cada uno, por lo tanto son ajustables.

Lo que se busca es encontrar entre todo el conjunto de acciones de control posibles aquella que minimice la función objetivo, considerando un horizonte de predicción Np .

Para agregar el efecto de los semáforos, se pueden tomar como base los trabajos de Dion & Hellings (2002) y Duerr (2000), en ambos casos se le otorga un peso a las detenciones y tiempos de espera en semáforos, análogos a los θ de la función anterior; esto se puede observar en la Ecuación (2.1).

Denotando J_s al término que considera los efectos de los semáforos, se puede calcular:

$$J_s = \sum_{\ell=1}^{Np} \hat{S}_i(k+\ell) \cdot \delta_B \cdot \hat{L}_i(k+\ell) \cdot \hat{T}_{S_i}(k+\ell) + \sum_{\ell=1}^{Np} \sum_{\sigma=1}^{Sem} \sum_{v=1}^{V_i^\sigma} \delta_v \cdot o_v \cdot \hat{T}_{S_v}(k+\ell) \quad (3.35)$$

donde:

$\hat{S}_i(k + \ell)$: Indica si el bus i está en semáforo en instante $k + \ell$

$\hat{T}s_v(k + \ell)$: Demora de vehículo v en instante $k + \ell$

$\hat{T}s_i(k + \ell)$: Demora de bus i en instante $k + \ell$

o_v : Ocupación de vehículo v

$\hat{L}_i(k + \ell)$: Ocupación predicha de bus i en instante $k + \ell$

N_p : Horizonte de predicción

V_i^σ : Total vehículos en instante i en semáforo σ

Sem : Total de semáforos

δ_B : Importancia relativa del tiempo de espera en semáforos para buses

δ_v : Importancia relativa del tiempo de espera en semáforos para autos

En la fórmula (3.35), el primer término corresponde a los efectos sobre el transporte público, y el segundo a los efectos sobre el transporte privado.

El término o_v es la ocupación de un vehículo. Para el caso de vehículos privados, la ocupación se fijará en un valor promedio constante. Sin embargo, en el caso de los buses, este término, que indica la tasa de ocupación, es conocido y se representa por la variable L_i , esto constituye una ventaja sobre la Ecuación (2.1), en la cual la tasa de ocupación tanto para buses como para vehículos de transporte privado se asume como conocida y constante.

La formula anterior corresponde al costo por demoras en todos los semáforos, considerando las acciones de control que se hayan ejecutado sobre ellos, de acuerdo a la Ecuación (3.27).

Hay que notar que hasta este punto las acciones de control son locales, es decir sólo afectan a uno de los semáforos. Luego, cuando se considera a los semáforos funcionando de forma coordinada, se debe tener en cuenta medidas para no afectar el desfase que existe entre los tiempos de verde de los semáforos.

Agregando la Ecuación (3.35) a la Ecuación (3.34), la nueva función objetivo queda con esta forma:

$$\begin{aligned}
 \underset{\{u(k), \dots, u(k+Np-1)\}}{\text{Min}} \quad J = & \sum_{l=1}^{Np} \left[\theta_1 \cdot \hat{H}_i(k+l) \hat{\Gamma}(k+l) + \theta_2 \cdot (\hat{H}_i(k+l) - \bar{H})^2 \right. \\
 & + \theta_3 \cdot \hat{L}_i(k+l) h_i(k+l-1) + \theta_4 \cdot \hat{\Gamma}(k+l) \hat{H}_{i+1}(k+l+z) (1 - S u_i(k+l-1)) \\
 & \left. + \hat{S}_i(k+l) \cdot \delta_B \cdot \hat{L}_i(k+l) \cdot \hat{T}s_i(k+l) \right]_{i=i(k+l)} \\
 & + \sum_{l=1}^{Np} \sum_{\sigma=1}^{Sem} \sum_{v=1}^{V_i^\sigma} \delta_v \cdot o_v \cdot \hat{T}s_v(k+l)
 \end{aligned} \tag{3.36}$$

Ésta es la ecuación que se usará para evaluar las distintas acciones de control, notar que el primer término de la Ecuación (3.35) , $\hat{S}_i(k + \ell) \cdot \delta_B \cdot \hat{L}_i(k + \ell) \cdot \hat{T}_{S_i}(k + \ell)$, se agrupó con los términos de la formulación anterior, dado que todos están relacionados con los buses, y por lo tanto están asociados a la ocurrencia de eventos. Por otro lado, el segundo término de la Ecuación (3.35), $\sum_{\ell=1}^{Np} \sum_{\sigma=1}^{Sem} \sum_{v=1}^{V_i^\sigma} \delta_V \cdot o_v \cdot \hat{T}_{S_v}(k + \ell)$, correspondiente a las demoras de los vehículos de transporte privado, está aparte de los anteriores, puesto que éstos vehículos no generan eventos en esta formulación.

3.3. Formulación del Problema de Coordinación entre Semáforos.

La coordinación de las señales de los semáforos puede favorecer la ejecución de acciones de control, esto se debe a que la coordinación puede aminorar la perturbación provocada por dichas acciones de control en los desfases entre semáforos. De esta manera se disminuye el efecto negativo que tienen las acciones de control sobre los usuarios de transporte privado.

Como se mencionó en el Capítulo 2 las programaciones de los semáforos incluyen desfases (*Offsets*) entre los tiempos de verde de semáforos consecutivos. Estos desfases se calculan dependiendo de la velocidad de los vehículos privados y de la distancia entre los semáforos; su objetivo es permitir el paso de los vehículos que pasaron en tiempo de verde por el semáforo inmediatamente aguas arriba y así disminuir las demoras totales.

En la Figura 3.13 se muestra en forma esquemática lo descrito arriba, esto es una representación de los desfases. Adicionalmente se muestra lo que se denomina ancho de banda (*bandwidth*). Este ancho de banda se calcula como el tiempo transcurrido entre el paso del primer y el último vehículo que pueden pasar sin detenerse por ambos semáforos. En este caso en particular el ancho de banda es igual a la duración del verde, esto se debe a que ambos semáforos tienen igual tiempo de verde (Roess, 2004) y a que no se consideran los largos de cola, lo cual no es necesariamente cierto en todos los casos.

Notar que si en el semáforo aguas arriba, se aumenta el tiempo de verde, el ancho de banda no se modifica, puesto que en el segundo semáforo el tiempo de verde se mantiene, tal como se muestra en la Figura 3.14.

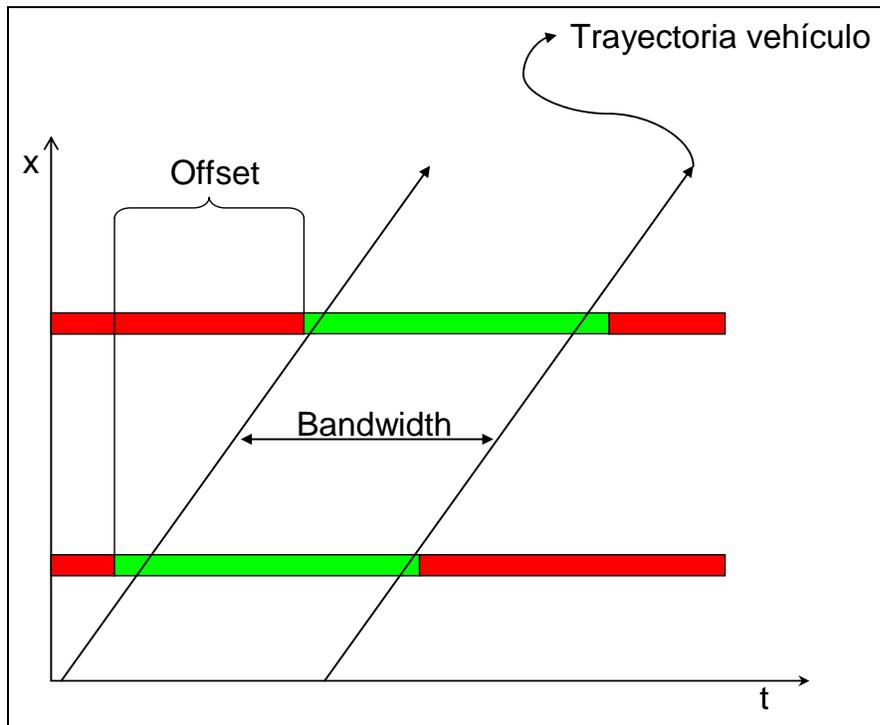


Figura 3.13. Desfase entre semáforos.
Fuente: Elaboración propia.

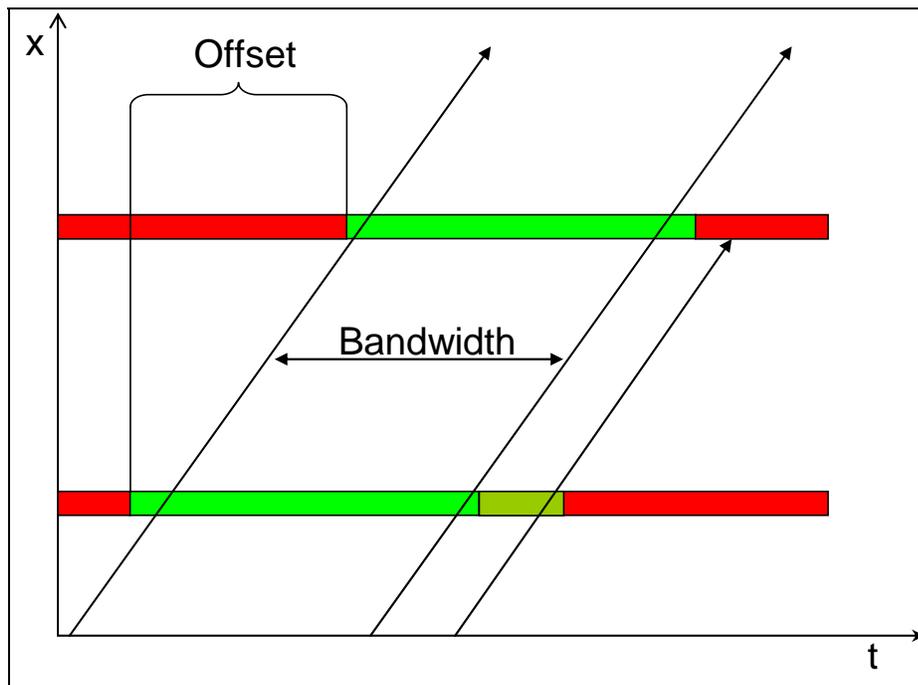


Figura 3.14. Efecto de la extensión de verde en un semáforo.
Fuente: Elaboración propia.

Esto se debe a que los vehículos adicionales que logren descargar por el semáforo con extensión de verde, deben detenerse en el semáforo de aguas abajo, dado que éste sigue con su programación normal. Es claro que si ambos semáforos ejecutan las mismas acciones de control, manteniendo el desfase correspondiente, el

ancho de banda aumentará. En el caso de adelantamiento de verde se da la misma situación.

Lo anterior es importante, puesto que permite mitigar el efecto de las acciones de control sobre el transporte privado, haciéndolas más atractivas.

La forma de implementar esto es sencilla, puesto que las acciones de control son las mismas que se definieron en la Ecuación (3.25), sólo se debe agregar el desfase correspondiente t_{Offset} , de manera que el semáforo de aguas abajo replique la acción de control del de aguas arriba en el ciclo correspondiente. De esta forma, la función objetivo se mantiene igual a lo que se mostró en la Ecuación (3.36).

3.4. Implementación de los Algoritmos Propuestos.

El problema de control con semáforos consiste en integrar la simulación de demanda por transporte privado y por transporte público con el simulador de movimiento de buses y el de semáforos. Los simuladores de demanda de transporte público y de movimiento de buses ya se encuentran implementados. Sólo resta implementar el simulador de transporte privado y el de semáforos.

En la sección siguiente se describirá la implementación del simulador de demanda por transporte privado, y luego el simulador de semáforos.

3.4.1. Algoritmo de Simulación de Demanda de Transporte Privado.

El primero de los problemas que necesita ser resuelto consiste en simular la demanda de transporte privado, de una manera sencilla, pero que permita obtener los resultados que componen la función objetivo, es decir, demoras en semáforos para usuarios de transporte público y privado, junto con los que ya se tienen en la formulación de Sáez et al, (2007).

Para esto se crean matrices que contienen los datos más importantes. Algunos valores se mantienen con un valor constante durante toda la simulación, otros se actualizan cada vez que se genera un evento. A continuación se describe las matrices que se mantienen constantes en el tiempo.

La matriz de características de los nodos tiene la forma que se muestra en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Matriz de características de los nodos

id	X[m]	Y[m]	sem	id2	ext
1	0	0	0	1	1
2	1200	100	0	0	1
3	1200	0	1	1	0
4	1200	-100	0	0	1
5	3120	100	0	0	1
6	3120	0	1	2	0
7	3120	-100	0	0	1
8	8000	0	0	10	1

En las filas, se muestran los distintos nodos, y en las columnas se muestran sus características de acuerdo a lo siguiente:

- Columna 1: identificación del nodo.
- Columna 2: coordenada X del nodo en metros.
- Columna 3: coordenada Y del nodo en metros.
- Columna 4: 1 si es semáforo, 0 si no.
- Columna 5: identificación del nodo en el sistema de buses.
- Columna 6: 1 si se trata de un nodo externo, 0 si no.

A continuación, en la Tabla 3.2 se muestra un extracto de la matriz de rutas. En esta modelación y dada la forma de la red, cada par origen destino tiene sólo una ruta posible. La tabla muestra las primeras 10 rutas.

Tabla 3.2 Matriz de rutas

id	origen	destino	secuencia				
1	1	2	1	3	2	0	0
2	1	4	1	3	4	0	0
3	1	5	1	3	6	5	0
4	1	7	1	3	6	7	0
5	1	8	1	3	6	8	0
6	2	1	2	3	1	0	0
7	2	4	2	3	4	0	0
8	2	5	2	3	6	5	0
9	2	7	2	3	6	7	0
10	2	8	2	3	6	8	0

donde:

- Columna 1: identificación de la ruta.
- Columna 2: nodo de origen de la ruta.
- Columna 3: nodo de destino de la ruta.
- Columna 4: inicio de secuencia de nodos de la ruta.

Para los flujos se definió una matriz origen destino, como la mostrada en la Tabla 3.3 con el total de vehículos que viajan de un nodo a otro durante el período de simulación.

Tabla 3.3 Matriz de origen destino

O/D	1	2	4	5	7	8
1	0	0	250	280	0	400
2	0	0	300	270	0	600
4	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	320	0	400
8	0	0	0	0	0	0

Ahora se describe las matrices con características que varían en el tiempo. La primera de ellas es la que describe el estado de los arcos, como se mencionó, cada par origen destino tiene asignada una sola ruta. Sin embargo, varias rutas pueden pasar por un mismo arco, por lo tanto, los arcos llevan flujos de varias rutas.

Tabla 3.4 Matriz de arcos

id	origen	destino	capacidad	longitud	autos en cola	longitud cola	buses	verde_rojo	tipo
2	3	1	1800	1200	0	0	1	1	-1
4	3	2	1800	100	0	0	0	1	-1
5	3	4	1800	100	0	0	0	1	-1
10	6	5	1800	100	0	0	0	1	-1
11	6	7	1800	100	0	0	0	1	-1
13	6	8	1800	4880	0	0	1	1	-1
7	3	6	1800	1920	0	0	1	1	0

La Tabla 3.4 muestra un fragmento de la matriz de arcos, las columnas indican lo siguiente:

- Columna 1: identificación del arco.
- Columna 2: nodo de origen del arco.
- Columna 3: nodo de destino del arco.
- Columna 4: capacidad en [veh/h].
- Columna 5: longitud en [m].
- Columna 6: total de autos en la cola.
- Columna 7: extensión de la cola en [veh].
- Columna 8: 1 si pasan buses por el arco, 0 si no.
- Columna 9: 1 si está en verde, 0 si está en rojo.
- Columna 10: -1 si es arco de salida de la red, 0 si es interno y 1 si es de entrada.

Notar que esta matriz tiene columnas que varían en el tiempo, estas son las columnas: 6, 7 y 9.

Los datos de los vehículos también varían en el tiempo, por esto se creó la matriz de estado de los vehículos, en la Tabla 3.5 se muestra un fragmento de esta matriz.

Tabla 3.5 Matriz de estado de vehículos

id	t_llegada	origen	destino	X	Y	ruta	arco actual	t_cola	t_arco	en cola	t_salida
1726	13.8747	2	8	1200	100	10	0	14.0462	18.2914	0	0
1640	13.9044	2	8	1200	100	10	7	14.0758	15.05	0	0
2000	13.9659	2	8	1200	100	10	3	14.1305	13.9659	1	0
1499	14.1617	2	5	1200	100	8	3	14.3262	14.1617	1	0
2100	14.2515	2	8	1200	100	10	3	14.4092	14.2515	1	0
1653	14.2688	2	8	1200	100	10	3	14.4265	14.2688	1	0
1339	14.4134	2	5	1200	100	8	3	14.5643	14.4134	1	0
1162	14.6062	2	4	1200	100	7	3	0	14.6062	0	0
2288	0.7705	7	5	3120	-100	24	0	0	0.942	0	1.1134
2330	0.8522	7	5	3120	-100	24	0	0	1.0236	0	1.1951

A continuación las variables de cada columna:

- Columna 1: identificación de vehículo.
- Columna 2: hora de entrada a la red [min].
- Columna 3: nodo de origen.

- Columna 4: nodo de destino.
- Columna 5: coordenada X en [m].
- Columna 6: coordenada Y en [m].
- Columna 7: ruta que usa el vehículo.
- Columna 8: arco actual.
- Columna 9: hora de llegada a la cola [min].
- Columna 10: hora de llegada al arco actual [min].
- Columna 11: 1 si está en cola, 0 si no.
- Columna 12: hora salida de la red [min].

3.4.2. Algoritmo Predictivo para Control de Semáforos.

Para los semáforos, los tiempos de duración de las fases prioritarias se guardaron dentro de una matriz, con la forma de la Tabla 3.6.

Tabla 3.6 Matriz de estado de vehículos

id semáforo	inicio	termino	verde/rojo
3	0	1	1
3	1	2	0
3	2	3	1
3	3	4	0
3	4	5	1
3	5	6	0
3	6	7	1

Las columnas guardan los siguientes datos:

- Columna 1: identificación del semáforo.
- Columna 2: hora de inicio de la fase [min].
- Columna 3: hora de término de la fase [min].
- Columna 4: 1 si está en fase verde, 0 si está en fase rojo.

La duración de las fases está dada por los repartos de verde de cada intersección. Esta tabla se lee a cada instante para saber el estado del semáforo, al ejecutar una acción de control sobre el semáforo, se cambian las columnas 2 y 3.

Como se mencionó en el Capítulo 3, cuando se realiza coordinación simplemente se replican los cambios del semáforo de aguas arriba en el de aguas abajo. En términos de programación esto significa que se deben cambiar las matrices de ambos semáforos en la misma magnitud pero en diferentes filas, para respetar el desfase.

4 Resultados.

Tanto los predictores como el simulador tienen componentes aleatorias, por lo tanto, cada una de las pruebas debe realizarse varias veces, todos los casos se repitieron 5 veces, a excepción del caso de control integrado coordinado, el cual por tener desviaciones estándar más altas se repitió 10 veces. Los resultados que aquí se muestran corresponden a los promedios de estas simulaciones.

Para todos los experimentos se simularán 2 horas de funcionamiento de una red de 10 paraderos y 2 intersecciones semaforizadas, una intersección semaforizada 80[m] antes del paradero 5 y otra 80[m] después del paradero 5. El intervalo de diseño entre buses es de 6 minutos, con una flota de 6 buses. La velocidad promedio de los buses es de 25 [km/h] y la de los autos de 35 [km/h]. Se puede hacer *station skipping* en todos los paraderos, pero sólo se puede hacer *holding* en los paraderos 4 y 7.

En la Figura 4.1 se muestra la red esquematizada, donde se indica la ubicación de los nodos, paraderos y semáforos.

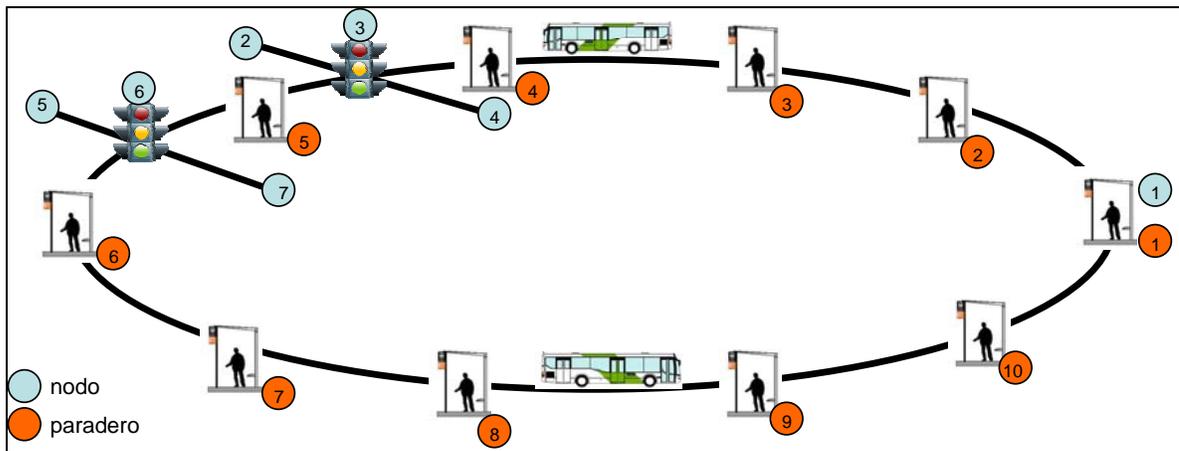


Figura 4.1. Esquema de la red modelada.

Fuente: Elaboración Propia.

La demanda de pasajeros de transporte público está esquematizada en la Figura 4.2, mientras que en la Figura 4.3 se muestra de forma análoga la demanda de vehículos privados entre los nodos de entrada y salida de la red.

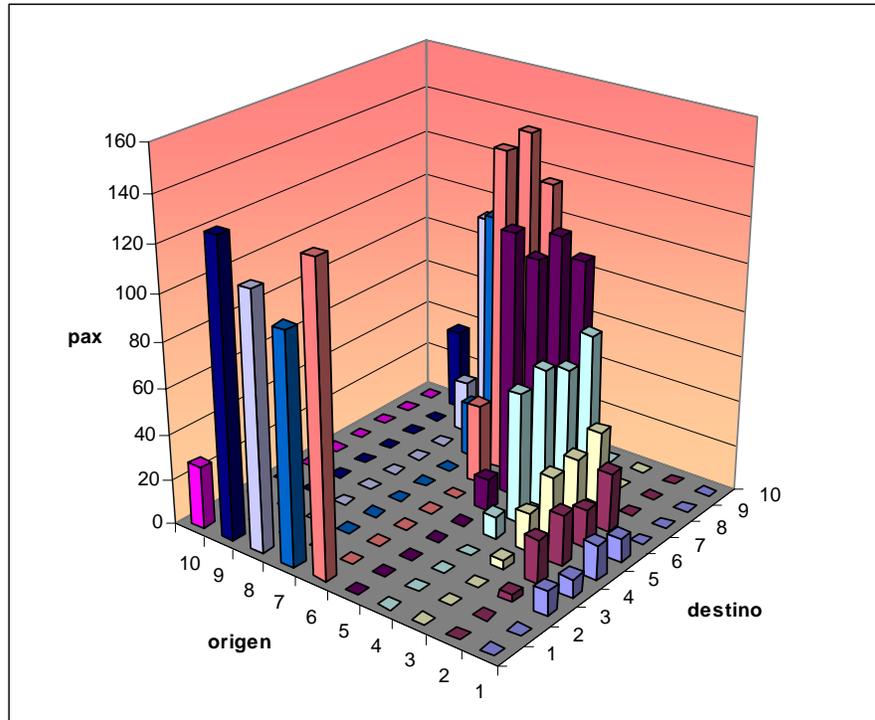


Figura 4.2. Demanda de pasajeros de transporte público.
Fuente: Elaboración Propia.

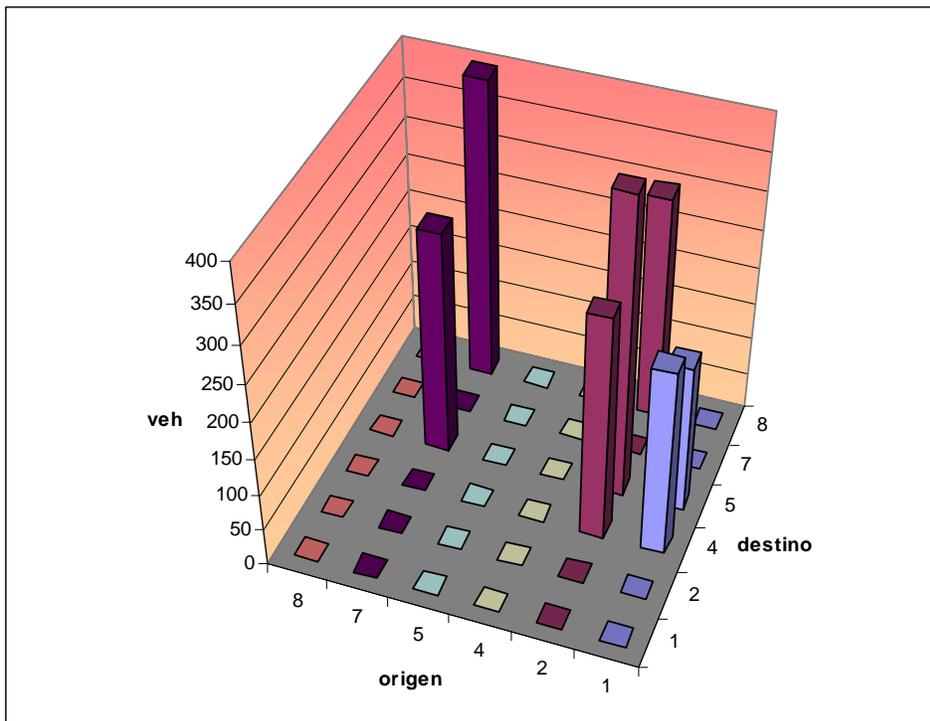


Figura 4.3. Demanda de vehículos privados.
Fuente: Elaboración Propia.

4.1 Comparación entre Escenarios de Control.

En esta sección se comparará el desempeño de las acciones de control sobre buses y semáforos en forma separada e integrada, esto con el fin de diferenciar el aporte de cada tipo de estrategia en el funcionamiento global del sistema.

Para esta comparación se ajustarán todos los coeficientes θ y δ al valor 1. Para recordar que significa cada uno de estos parámetros, observar Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Parámetros de control.

Parámetros	Valor	Significado
θ_1	1	importancia espera paraderos
θ_2	1	importancia regular intervalo
θ_3	1	costo holding
θ_4	1	costo station skipping
δ_B	1	importancia espera semáforo buses
δ_V	1	importancia espera semáforo auto

Los autos totales que entran a la red son 2150, esto durante las 2 horas de simulación que se estipularon al inicio del capítulo. Por ahora se supondrá que la velocidad de los vehículos privados no tiene ruido, esto debido a que otras pruebas han demostrado que esto hace inestable al controlador en el caso de control integrado coordinado. Los escenarios de control programados se detallan en la Tabla 4.2.

En la Tabla 4.2 se muestran 3 tipos de control: Buses, significa que las estrategias incluyen *holding* (retención en paradero) y *station skipping* (salto de paradero). Semáforos, incluye la extensión y adelantamiento de verde. Por último Coordinación, indica que de haber control de semáforos éste se realiza de forma coordinada en ambos semáforos, tal como se detalló en el Capítulo 3.

Tabla 3.2 Escenarios de Control a Comparar.

Escenario	Tipo de Control		
	Buses	Semáforos	Coordinación
1 LAZO ABIERTO (open loop)	no	no	no
2 CONTROL BUSES	si	no	no
3 CONTROL SEMÁFORO	no	si	no
4 CONTROL SEMÁFORO COORDINADO	no	si	si
5 CONTROL INTEGRADO	si	si	no
6 CONTROL INTEGRADO COORDINADO	si	si	si

A continuación, en la Tabla 4.3 se muestra un resumen de los resultados obtenidos para cada uno de estos escenarios.

Tabla 4.3 Resultados de demoras y esperas para distintos escenarios.

CONTROL LAZO ABIERTO (open loop)	prom* [min]	desvest* [min]	% desv*
espera promedio pasajeros	8.86	0	0
demora promedio de bus en semáforo	2.48	0	0
demora promedio de autos en semáforos	0.4	0	0
CONTROL SÓLO BUSES	prom [min]	desvest [min]	% desv
espera promedio pasajeros	6.45	0	0
demora promedio de bus en semáforo	1.71	0	0
demora promedio de autos en semáforos	0.58	0	0
CONTROL SEMÁFOROS	prom [min]	desvest [min]	% desv
espera promedio pasajeros	8.83	0	0
demora promedio de bus en semáforo	1.85	0	0
demora promedio de autos en semáforos	0.41	0	0
CONTROL SEMÁFOROS COORDINADO	prom [min]	desvest [min]	% desv
espera promedio pasajeros	8.83	0	0
demora promedio de bus en semáforo	1.85	0	0
demora promedio de autos en semáforos	0.41	0	0
CONTROL INTEGRADO	prom [min]	desvest [min]	% desv
espera promedio pasajeros	5.79	0.6	10.36
demora promedio de bus en semáforo	1.72	0.04	2.33
demora promedio de autos en semáforos	0.56	0.02	3.57
CONTROL INTEGRADO COORDINADO	prom [min]	desvest [min]	% desv
espera promedio pasajeros	4.9	0.22	4.49
demora promedio de bus en semáforo	1.1	0.56	50.91
demora promedio de autos en semáforos	0.78	0.12	15.38

*prom: promedio.

*desvest: desviación estándar.

*%desv: porcentaje de variación respecto al promedio.

Notar que las bajas varianzas de los escenarios 1 al 5 justifican un número de repeticiones menor al del escenario 6.

Las cifras en rojo de la Tabla 4.3 muestran los valores mínimos de los tiempos de espera en paraderos y demoras en semáforos. Notar que los mejores resultados en promedio corresponden al control integrado coordinado. Sin embargo, la desviación estándar del tiempo de demora en semáforos para usuarios de buses es alta. Esto se debe al carácter aleatorio del predictor de demanda de vehículos privados, considerando velocidad variable se obtienen valores de desviación estándar aún mayores.

Para los escenarios de control con semáforos y semáforos coordinados las desviaciones estándar no son exactamente cero, pero tienen un valor mucho menor que 1%.

Hay que comparar el funcionamiento de las estrategias con semáforos con las de control de buses y en lazo abierto. Estas comparaciones se muestran en la Tabla 4.4.

En la Tabla 4.4 se muestran las mejoras porcentuales de cada estrategia, la segunda columna corresponde a la mejora sobre el control en lazo abierto y la tercera a la mejora sobre control de buses. Se aprecia que el control integrado coordinado mejora significativamente las esperas en semáforo y en paraderos. Al contrario el resto de los escenarios no presentan mejoras sobre el control de buses, y en muchos casos el desempeño es peor. Sin embargo, el efecto sobre los usuarios de transporte privado es importante.

Tabla 4.4 Mejoras porcentuales de los escenarios con control de semáforos.

CONTROL LAZO ABIERTO	I.a.* [%]	buses* [%]
espera promedio pasajeros	*	*
demora promedio de bus en semáforo	*	*
demora promedio de autos en semáforos	*	*
CONTROL SÓLO BUSES	I.a. [%]	buses [%]
espera promedio pasajeros	27.2	*
demora promedio de bus en semáforo	31.05	*
demora promedio de autos en semáforos	-45	*
CONTROL SEMÁFOROS	I.a. [%]	buses [%]
espera promedio pasajeros	0.34	-36.9
demora promedio de bus en semáforo	25.4	-8.19
demora promedio de autos en semáforos	-2.5	29.31
CONTROL SEMÁFOROS COORDINADO	I.a. [%]	buses [%]
espera promedio pasajeros	0.34	-36.9
demora promedio de bus en semáforo	25.4	-8.19
demora promedio de autos en semáforos	-2.5	29.31
CONTROL INTEGRADO	I.a. [%]	buses [%]
espera promedio pasajeros	34.65	10.23
demora promedio de bus en semáforo	30.65	-0.58
demora promedio de autos en semáforos	-40	3.45
CONTROL INTEGRADO COORDINADO	I.a. [%]	buses [%]
espera promedio pasajeros	44.7	24.03
demora promedio de bus en semáforo	55.65	35.67
demora promedio de autos en semáforos	-95	-34.48

*I.a.: control en lazo abierto.

*buses: control sólo con buses

Las mejoras se deben a que con el control integrado coordinado el sistema se parece a un sistema sin semáforos y las operaciones de *holding* y *station skipping* no se ven perturbadas. Notar que el control se semáforos por sí sólo no genera buenos resultados, sino que se desempeña mejor en conjunto con las estrategias en paraderos.

Recordar que uno de los objetivos del controlador es regularizar los intervalos entre buses. Una buena medida de esta regularidad es la desviación estándar de los intervalos entre buses. A continuación, en la Tabla 4.5 se muestra la desviación estándar de los intervalos asociados a una simulación de ejemplo con los mismos parámetros que ya se indicaron, agregadas para los diez paraderos. Separadamente se

muestra la desviación del paradero 5, ubicado entre los dos semáforos del sistema. Para ver el detalle de estos cálculos y el total de datos de desfase revisar los anexos.

Tabla 4.5 Desviación estándar de intervalos para una simulación.

Ejemplo	H_prom	H_desvest	H_par5	H_desvest5
CONTROL LAZO ABIERTO	5.03	4.46	4.91	3.92
CONTROL SÓLO BUSES	4.79	4.16	4.64	3.89
CONTROL SEMÁFOROS	5.05	4.45	4.87	3.97
CONTROL SEMÁFOROS COORDINADO	5.05	4.45	4.87	3.97
CONTROL INTEGRADO	4.97	3.70	5.13	3.34
CONTROL INTEGRADO COORDINADO	4.89	3.87	4.95	3.70

Notar que los dos últimos escenarios tienen las desviaciones estándar más bajas, un hecho que no es posible visualizar aquí, pero que se puede corroborar en los datos de los anexos es que la desviación del paradero 5 es siempre baja comparada con el resto de los paraderos.

Los gráficos en los que se muestran los intervalos promedios por paradero y las desviaciones estándar por paradero, para todas las estrategias mostradas en la Tabla 4.2 se encuentran en los anexos digitales en la sección *Resultados*. Para constatar la mejora aportada por el control integrado coordinado las Figuras 4.4 y 4.5 muestran la situación de los intervalos sin control y con control integrado coordinado respectivamente.

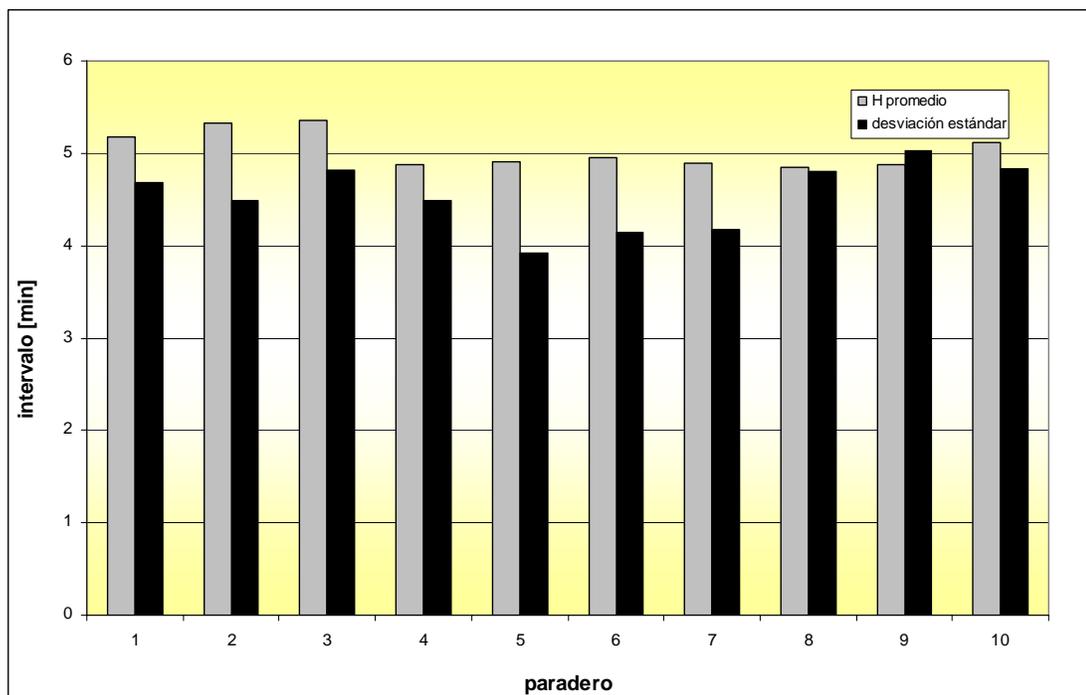


Figura 4.4. Intervalo promedio y desviación por paradero (sin control)

Fuente: Elaboración Propia

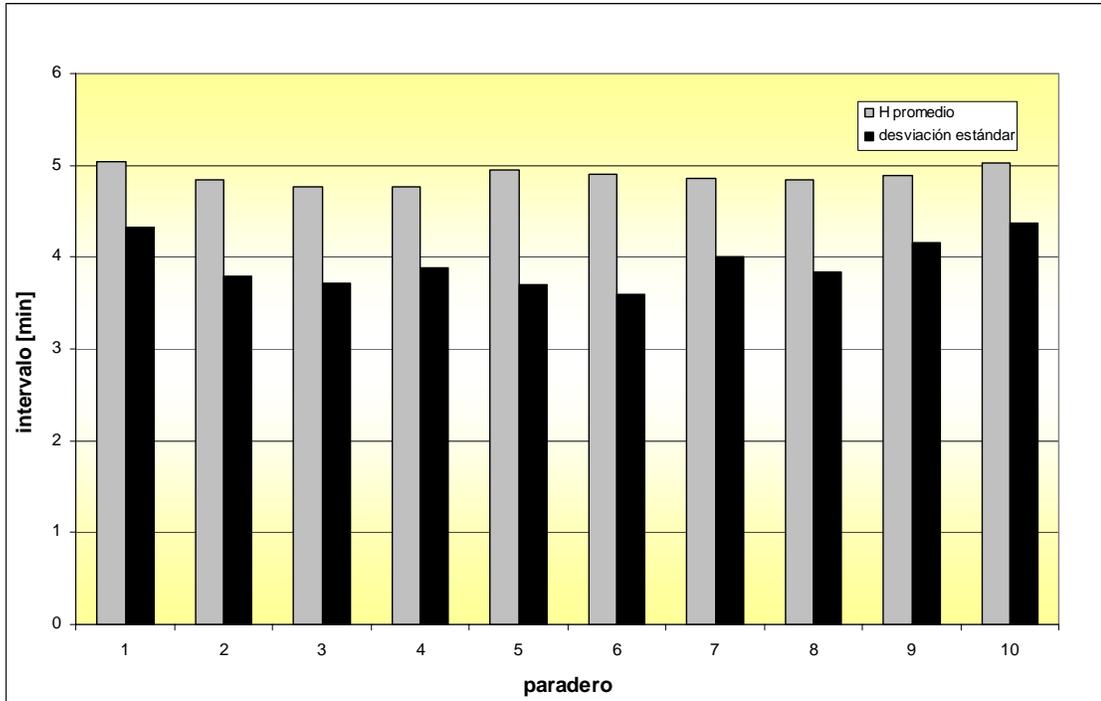


Figura 4.5. Intervalo promedio y desviación por paradero (control integrado coordinado)
 Fuente: Elaboración propia.

En las Figuras 4.4 y 4.5 se constata que los intervalos no sufren mayor cambio. Sin embargo, las desviaciones estándar de los intervalos bajan considerablemente si se comparan con la situación sin control.

Como se observa en la Tabla 4.3, pesar de que la reducción de tiempos de espera y demoras en semáforo es grande, la varianza entre las distintas repeticiones también lo es. Esto se debe a que el predictor se basa en probabilidades y es aleatorio, por lo tanto, puede predecir situaciones futuras distintas dadas las mismas condiciones iniciales. Dada la forma de la función objetivo es posible que unos pocos autos hagan que la estrategia de control que se decide sea distinta.

Para comprobar lo anterior se realizaron las mismas pruebas que en la Tabla 4.3, pero con una demanda de vehículos privados igual a la mitad de la anterior, es decir 1075 autos. Además el parámetro δ_v de la Tabla 4.1 de importancia de la espera en semáforos de los autos se redujo de 1 a 0.1.

Tabla 4.6 Resultados de demoras y esperas para distintos escenarios ($\delta_v = 0.1$).

CONTROL LAZO ABIERTO	prom [min]	desvest [min]	% desv
espera promedio pasajeros	8.86	0	0
demora promedio de bus en semáforo	2.48	0	0
demora promedio de autos en semáforos	0.19	0	0
CONTROL SÓLO BUSES	prom [min]	desvest [min]	% desv
espera promedio pasajeros	6.46	0	0
demora promedio de bus en semáforo	1.71	0	0
demora promedio de autos en semáforos	0.21	0	0
CONTROL SEMÁFOROS	prom [min]	desvest [min]	% desv
espera promedio pasajeros	8.86	0	0
demora promedio de bus en semáforo	2.48	0	0
demora promedio de autos en semáforos	0.19	0	0
CONTROL SEMÁFOROS COORDINADO	prom [min]	desvest [min]	% desv
espera promedio pasajeros	8.86	0	0
demora promedio de bus en semáforo	2.48	0	0
demora promedio de autos en semáforos	0.19	0	0
CONTROL INTEGRADO	prom [min]	desvest [min]	% desv
espera promedio pasajeros	5.73	0.25	4.36
demora promedio de bus en semáforo	2.12	0.48	22.64
demora promedio de autos en semáforos	0.21	0.01	4.76
CONTROL INTEGRADO COORDINADO	prom [min]	desvest [min]	% desv
espera promedio pasajeros	4.94	0.38	7.69
demora promedio de bus en semáforo	0.86	0.23	26.74
demora promedio de autos en semáforos	0.22	0	0

En la Tabla 4.6 se puede notar la baja de aproximadamente 25% en la varianza del caso de control integrado coordinado. Esto se debe a que este ejemplo se parece a una situación sin autos. De hecho los tiempos de espera y demoras en semáforos para los usuarios de bus son aún menores a los mostrados en la Tabla 4.3, puesto que no hay autos suficientes en las ramas no prioritarias para impedir que a los buses se les otorgue prioridad.

El ejemplo es muy pequeño como para hacer mayor análisis sobre éste. Sin embargo, permite aclarar cuales son los factores que producen las grandes desviaciones estándar en los resultados.

Por los resultados, se puede suponer que es el control integrado coordinado el que produce mejores resultados, considerando tiempos de espera, demoras y regularidad de intervalos. En adelante sólo se trabajará sobre este enfoque. Primero se estudia su sensibilidad a los parámetros δ , luego frente a la demanda por transporte privado y al horizonte de predicción. En adelante los resultados destacados con color azul en las Tablas 4.3 y 4.5 serán tomados como base de comparación para todos los parámetros a sensibilizar.

4.2 Sensibilidad con Respecto a los Parámetros.

En esta sección se revisará como varían los resultados si se cambia el parámetro δ_B . Ya se tiene el resultado con el parámetro ajustado en 1. Se analizará como varían los resultados si se ajusta al valor 10 y a 0.5.

En la Tabla 4.7 se muestran los resultados para δ_B igual a 10, notar que el tiempo de espera y demora en semáforos son aún menores que los de la Tabla 4.3. Esto es de esperar ya que con el parámetro δ_B ajustado en 10 los buses cobran mayor importancia.

Tabla 4.7 Resultados de demoras y esperas para control integrado.

CONTROL INTEGRADO COORDINADO	prom [min]	desvest [min]	% var
espera promedio pasajeros	4.88	0.28	5.74
demora promedio de bus en semáforo	0.98	0.38	38.78
demora promedio de autos en semáforos	0.83	0.12	14.46

En términos de regularidad de intervalos, considerando un ejemplo, se obtuvo una desviación estándar menor a las mostradas en la Tabla 4.5 (observar Tabla 4.8). Sin embargo, en este ejemplo la desviación de los intervalos del paradero 5 no es la menor, pero es baja comparada con el promedio de los otros paraderos. En la Tabla 4.8 se muestra los valores promedio y desviaciones para el ejemplo mencionado.

Tabla 4.8 Intervalos con control integrado coordinado.

H_prom	[min]	4.92
H_desvest	[min]	3.76
H_prom_par5	[min]	4.95
H_desvest_par5	[min]	3.53

Revisando la situación de todos los paraderos, que se muestra en la Figura 4.6, que parece en la siguiente página, se verifica que el paradero 5 es el que tiene la menor desviación estándar de intervalos, y que la mayoría de los paraderos tiene un promedio de intervalo similar. Si bien la desviación estándar no es pequeña, se puede notar un cambio importante si se compara con la Figura 4.7, donde se muestra la situación sin control. En esta figura las desviaciones son mayores y los intervalos promedio entre los distintos paraderos tienen mayores diferencias, incluso en algunos casos, como en los paraderos 8, 9 y 10, la varianza es similar al intervalo promedio.

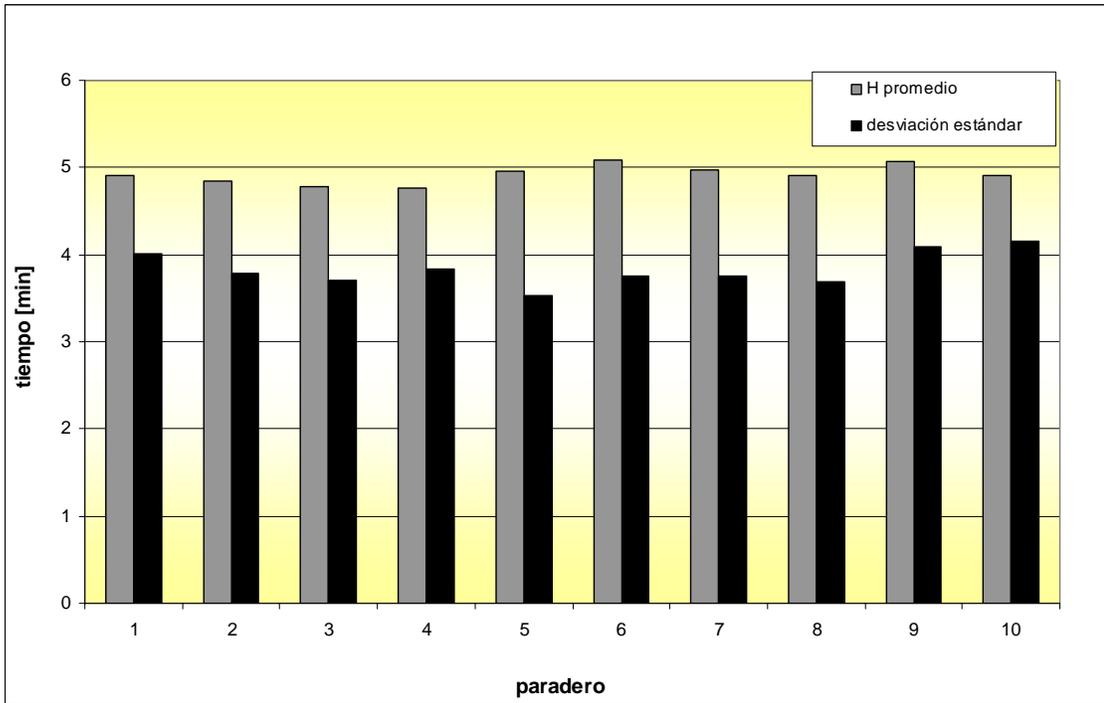


Figura 4.6. Intervalos promedio por paradero $\delta_B = 10$

Fuente: Elaboración propia

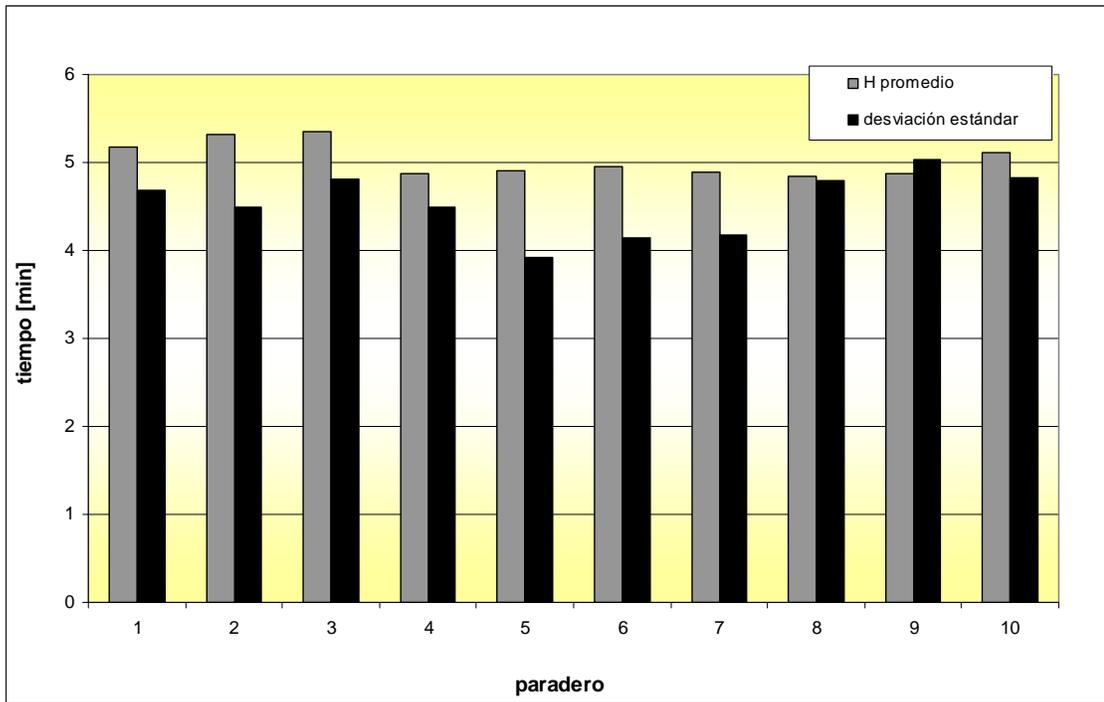


Figura 4.7. Intervalos promedio por paradero (sin control)

Fuente: Elaboración propia

A continuación se muestra el caso con el parámetro δ_B igual a 0.5, es decir, la demora en semáforos de los usuarios de transporte público tiene menos importancia relativa. En la Tabla 4.9 se observa un leve aumento en las demoras y esperas de los usuarios de transporte público y una mejora para los de transporte privado.

Tabla 4.9 Esperas y demoras para control integrado coordinado2.

CONTROL INTEGRADO COORDINADO	prom [min]	desvest [min]	% var
espera promedio pasajeros	4.94	0.29	5.87
demora promedio de bus en semáforo	1.07	0.53	49.53
demora promedio de autos en semáforos	0.78	0.12	15.38

En la Tabla 4.10 se observa que al dar menos importancia a las demoras en semáforos de los buses se perjudica levemente la regularidad de los intervalos, puesto que las desviaciones estándar son mayores.

Tabla 4.10 Intervalos con sus desviaciones para control integrado coordinado2.

H_prom [min]	4.89
H_desvest [min]	3.87
H_prom_par5 [min]	4.97
H_desvest_par5 [min]	3.68

La Figura 4.8 muestra resultados similares a la Figura 4.6. Sin embargo, un análisis más detallado revela aumentos en las desviaciones para todos los paraderos.

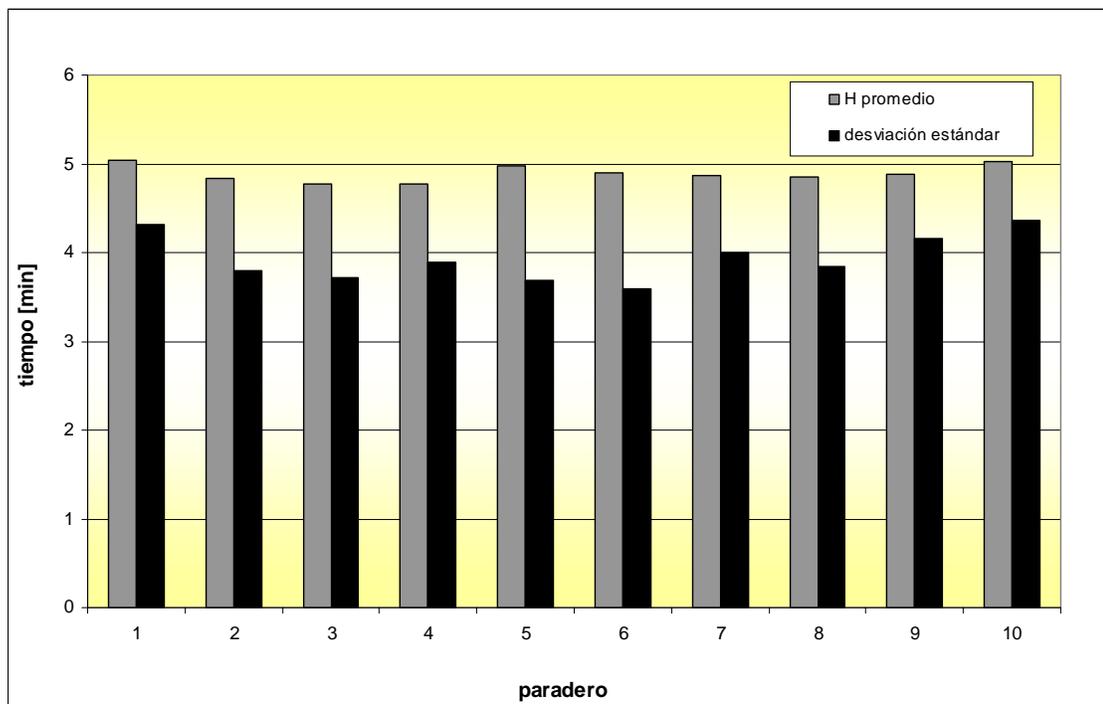


Figura 4.8. Intervalos promedio por paradero $\delta_B = 0.5$

Fuente: Elaboración propia

4.3 Sensibilidad con Respecto a la Demanda.

En esta sección se supondrá que los parámetros θ y δ se mantienen constantes en el valor 1, y se analizará la sensibilidad de los resultados frente a una demanda 20% menor y otra 20% mayor.

Las Tablas 4.11 y 4.12 muestran los resultados para la situación con baja demanda, mientras que las 4.13 y 4.14 muestran los de alta demanda. Para reflejar los cambios en tiempos de viaje producto de la mayor cantidad de autos se agregaron los tiempos de viaje en auto en los resultados. Se observa un gran aumento en los tiempos de viaje en auto, producto de las colas más largas que se forman.

Sin embargo, para los buses la situación con alta demanda es más favorable. Esto debe en parte a que los buses se encuentran aislados de los autos, además, a pesar de haber más autos viajando en las vías no prioritarias, también los hay en la vía prioritaria. Por lo tanto, las medidas de prioridad en semáforos se hacen más provechosas, aunque los más beneficiados siempre son los usuarios de los buses.

Para los intervalos se obtuvo un resultado similar, con mejores resultados en el caso con más demanda. Esto se puede apreciar en las Figuras 4.9 y 4.10, pues la Figura 4.10 entrega varianzas menores a las de la Figura 4.9.

Sin embargo, a pesar de lo anterior, el efecto no es grande, debido a que parte de la regularización del intervalo se debe a las estrategias de *holding* y *station skipping*. Las estrategias de prioridad en semáforo aportan disminuyendo la perturbación de los semáforos.

Tabla 4.11 Demoras y esperas con demanda disminuida.

CONTROL INTEGRADO COORDINADO	prom [min]	desvest [min]	% var
espera promedio pasajeros	5.21	0.37	7.1
tiempo promedio en bus	9.68	0.1	1.03
demora promedio de bus en semáforo	0.94	0.36	38.3
demora promedio de autos en semáforos	0.44	0.01	2.27
tiempo promedio viaje en auto	5.96	0.1	1.68

Tabla 4.12 Intervalos con demanda disminuida.

H_prom [min]	4.92
H_desvest [min]	3.78
H_prom_par5 [min]	4.95
H_desvest_par5 [min]	3.52

Tabla 4.13 Demoras y esperas con demanda aumentada.

CONTROL INTEGRADO COORDINADO	prom [min]	desvest [min]	% var
espera promedio pasajeros	5.09	0.37	7.27
tiempo promedio en bus	9.61	0.13	1.35
demora promedio de bus en semáforo	0.99	0.48	48.48
demora promedio de autos en semáforos	1.12	0.12	10.71
tiempo promedio viaje en auto	9.92	0.41	4.13

Tabla 4.14 Intervalos con demanda aumentada.

H_prom	[min]	4.85
H_desvest	[min]	3.68
H_prom_par5	[min]	5.14
H_desvest_par5	[min]	3.65

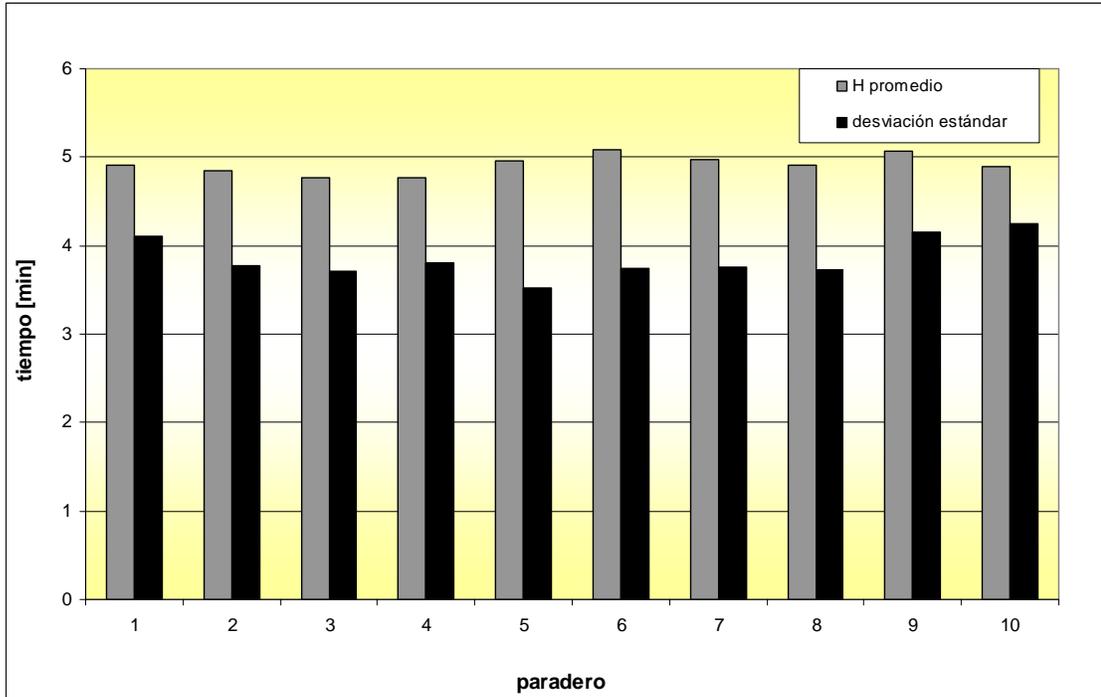


Figura 4.9. Intervalos promedio por paradero (demanda disminuida)
Fuente: Elaboración propia

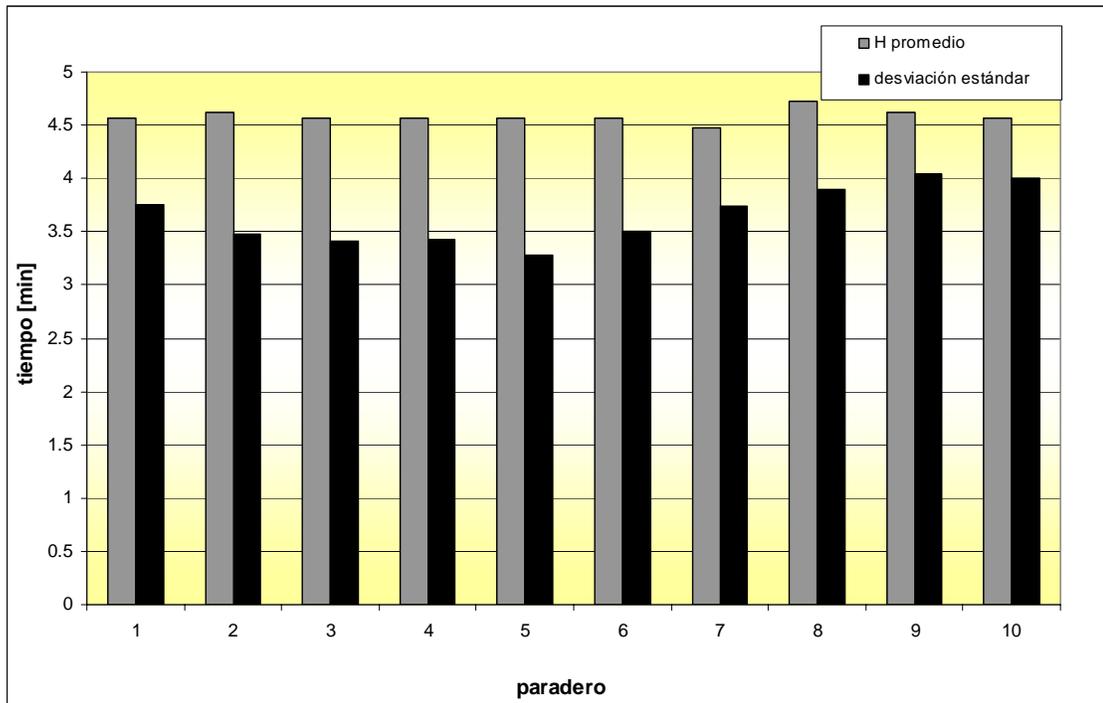


Figura 4.10. Intervalos promedio por paradero (demanda disminuida)
 Fuente: Elaboración propia

Las acciones de control de *holding* y *station skipping*, sumadas a la presencia de vehículos de transporte privado en la fase no prioritaria, pueden hacer que se pierda de vista el *trade-off* que existe entre demoras de usuarios de transporte privado y usuarios de transporte público, puesto que la función objetivo está enfocada a éstos últimos. A continuación se muestra un experimento en que sólo se tiene demanda de transporte privado en la fase no prioritaria, es decir entre los nodos 2 y 4, y 7 y 5, según la Figura 4.1. Además en la función objetivo sólo se tiene en cuenta las demoras en semáforos de usuarios de transporte público y privado, es decir, los parámetros θ se fijaron en 0, mientras que los parámetros δ se fijaron en 1.

En la Tabla 4.15 se muestra los resultados con una demanda de transporte privado de 100 vehículos por cada una de las entradas a la red, es decir, 200 en total. Como no sólo se está considerando demoras en semáforos, no se mostrarán resultados de tiempos de espera en paraderos ni de intervalos, para ver estos resultados, consultar anexos.

Tabla 3.15 Demoras y esperas con demanda en vía no prioritaria de 100.

CASO CONTROL INTEGRADO COORDINADO	prom	desvest	% var
demora promedio de bus en semáforo	1.13	0.01	0.88
demora promedio de autos en semáforos	0.1	0	0

En las Tablas 4.16 y 4.17 se muestra los resultados obtenidos con demanda en vía no prioritaria de 300 y 500 vehículos respectivamente.

Tabla 4.16 Demoras y esperas con demanda en vía no prioritaria de 300.

CASO CONTROL INTEGRADO COORDINADO	prom	desvest	% var
demora promedio de bus en semáforo	1.44	0.56	38.89
demora promedio de autos en semáforos	0.14	0.01	7.14

Tabla 4.17 Demoras y esperas con demanda en vía no prioritaria de 500.

CASO CONTROL INTEGRADO COORDINADO	prom	desvest	% var
demora promedio de bus en semáforo	1.33	0.37	27.82
demora promedio de autos en semáforos	0.19	0.02	10.53

Notar que para demandas mayores de transporte privado, no solamente crecen las demoras en los semáforos para los vehículos privados, producto de la congestión, sino que los usuarios de transporte público también ven aumentar sus demoras, ya que es menos conveniente aplicar las estrategias de prioridad para buses cuando el flujo en la vía no prioritaria es alto. Además, observar que cuando crecen los flujos, la variabilidad en los resultados también crece, es decir, el controlador se vuelve más inestable.

Para todos los casos anteriores se ha establecido el horizonte de predicción de 3 pasos. Esto significa que cada vez que ocurre un evento el sistema optimiza simulando hasta cuatro eventos más adelante del actual. Esto es un parámetro de la simulación; un horizonte de predicción mayor implica un mayor tiempo de ejecución del algoritmo, por lo tanto, es conveniente chequear el funcionamiento del algoritmo si se usa un horizonte de predicción menor.

4.4 Sensibilidad con Respecto al Horizonte de Predicción.

Para chequear la sensibilidad del sistema al horizonte de predicción, en Sáez et al (2007) se realizaron este tipo de pruebas, pero el sistema de control ha sido modificado, por lo que es necesario realizar nuevas pruebas. Las Tablas 4.18 y 4.19 muestran los resultados para un horizonte de predicción igual a 1 evento, mientras que la Figura 4.11 muestra los resultados por paradero.

Tabla 4.18 Demoras y esperas con horizonte de predicción de 1.

CONTROL INTEGRADO COORDINADO	prom [min]	desvest [min]	% var
espera promedio pasajeros	4.85	0	0
demora promedio de bus en semáforo	2.44	0	0
demora promedio de autos en semáforos	0.63	0	0

Tabla 4.19 Intervalos con horizonte de predicción de 1.

H_prom	[min]	4.84
H_desvest	[min]	3.83
H_prom_par5	[min]	4.70
H_desvest_par5	[min]	3.30

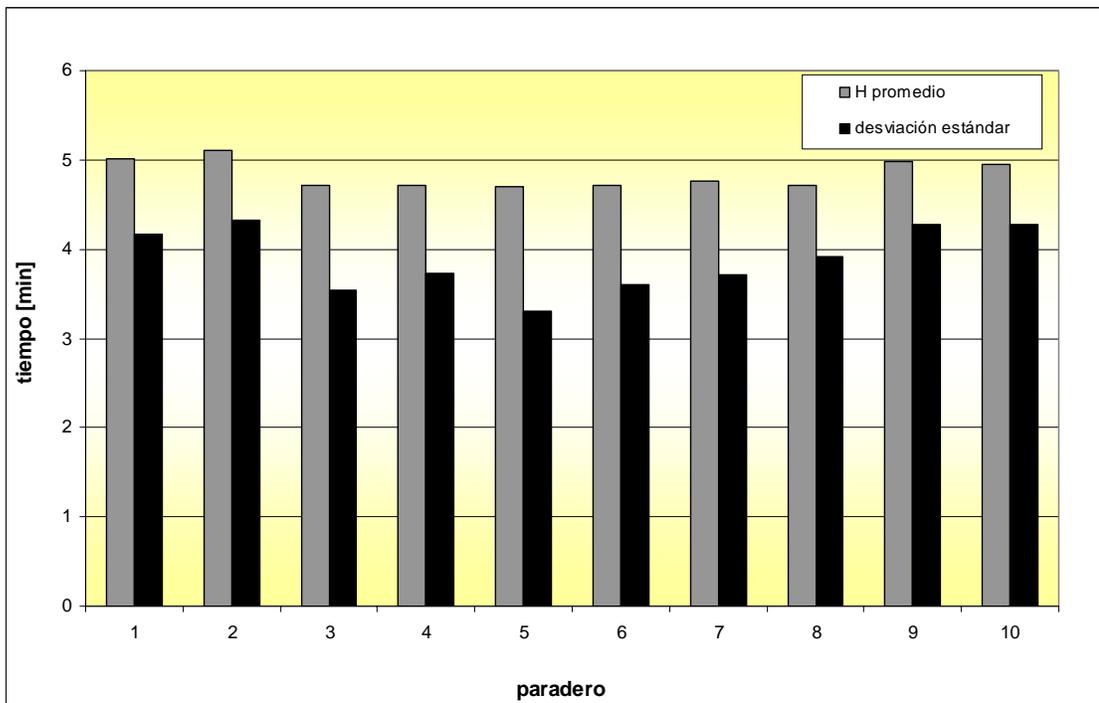


Figura 4.11. Intervalos promedio por paradero (horizonte de predicción =1)
Fuente: Elaboración propia

Si los datos de la Tabla 4.18 se comparan con el horizonte de predicción de 3 eventos que se muestra en la Tabla 4.3, se aprecia que el tiempo de espera aumento de 1 minuto a 2,4 minutos. Sin embargo, las desviaciones de los intervalos no varían.

En las Tablas 4.20 y 4.21, y en la Figura 4.12 se muestran los resultados para el caso de un horizonte de 2 eventos.

Tabla 4.20 Demoras y esperas con horizonte de predicción de 2.

CONTROL INTEGRADO COORDINADO	prom [min]	desvest [min]	% var
espera promedio pasajeros	4.93	0.19	3.85
demora promedio de bus en semáforo	1.31	0.74	56.49
demora promedio de autos en semáforos	0.75	0.06	8

Tabla 4.21 Intervalos con horizonte de predicción de 2.

H_prom	[min]	4.89
H_desvest	[min]	3.87
H_prom_par5	[min]	4.97
H_desvest_par5	[min]	3.68

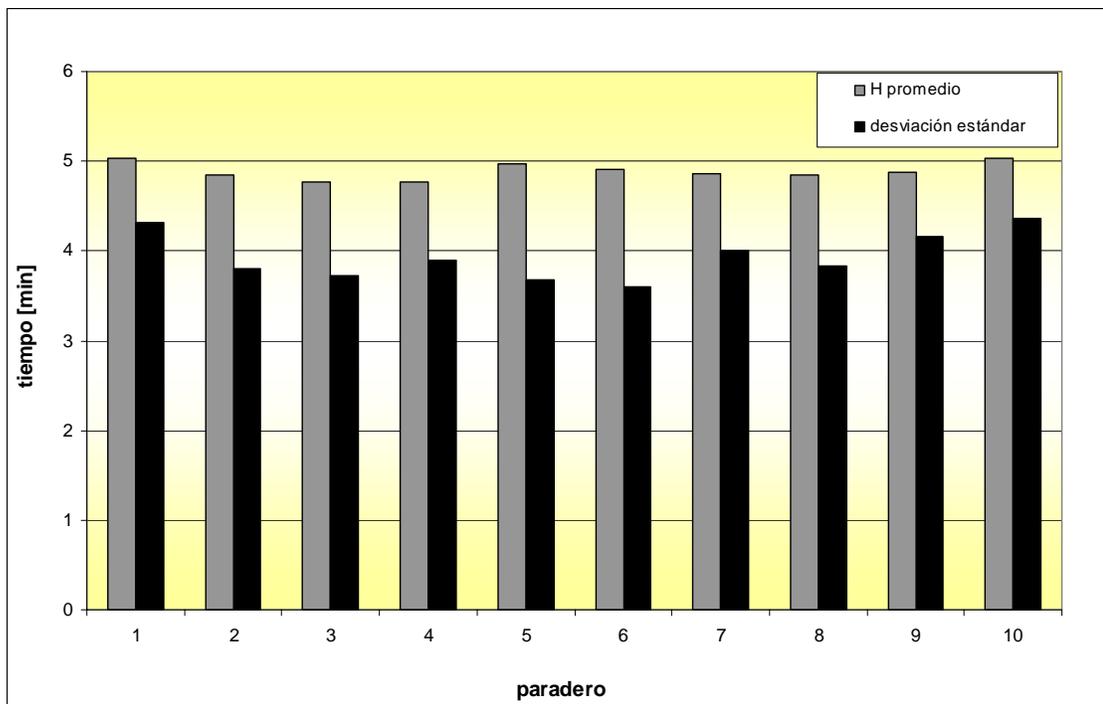


Figura 4.12. Intervalos promedio por paradero (horizonte de predicción =2)

Fuente: Elaboración propia

Notar que los intervalos mantienen desviaciones similares en el caso con horizonte de predicción de 1, 2 o 3 eventos, pero las demoras de buses en los semáforos disminuyen al aumentar el horizonte de predicción, y las demoras de los autos en semáforos tienden a subir, pero de manera menos notoria.

5 Discusión.

5.1 Análisis de Resultados.

Luego de aplicar control integrado coordinado, y comparar con la situación sin control y la situación con control de buses en paraderos, se aprecia mejoras, tanto en los tiempos de espera en paraderos y demoras en semáforos de los usuarios de transporte público, así como en la regularidad de los intervalos. Sin embargo, la mejora para este último índice es menor comparada con lo logrado en los tiempos de demora en semáforos, esto se debe a que la regularidad en el control de los intervalos está más ligada a las acciones de control en paraderos.

Si bien se logran disminuciones en las demoras al aumentar la importancia del parámetro asociado, estas mejoras no son del orden de la diferencia entre parámetros. Basta observar las Tablas 4.7 y 4.9 donde el parámetro aumenta de 0.5 a 10, pero la demora sólo disminuye de 1.07 a 0.98 [min.] en promedio, esto es alrededor del 8% siendo que la importancia del parámetro aumentó 20 veces.

Al contrario de lo que se podría pensar, a mayor demanda de transporte privado las estrategias de control de semáforos son más efectivas para los buses. Esto se debe a que en estos casos hay muchos vehículos que circulan por la vía prioritaria, haciendo que las demoras totales de las vías prioritarias crezcan; a causa de esto una modificación de los tiempos de verde resulta beneficiosa. Sin embargo, si sólo se considera flujo de vehículos privados en las vías no prioritarias, ocurre lo contrario, esto se debe a que cuando dichos flujos crecen se forman mayores colas en los accesos a la red, si a esto se le agrega tiempos de verde menores para las vías no prioritarias, producto de las acciones de control que benefician al transporte público, entonces las demoras de los usuarios de transporte privado tendrán un aumento importante.

A pesar de la anterior, son los usuarios de transporte público quienes más se benefician de estas acciones, ya que estas sólo se activan en presencia de buses. El resto del tiempo las intersecciones semaforizadas siguen con sus programaciones prefijadas. Esto se debe a la forma de implementación de las estrategias de control, una formulación distinta podría atribuir más importancia a los usuarios de transporte privado.

Con respecto al horizonte de predicción, los resultados muestran que a mayor horizonte se tienen mejores indicadores para los buses, a cambio de un leve aumento en las demoras de los privados. Sin embargo, esto también implica un crecimiento significativo en los tiempos de ejecución, por lo que no es recomendable usar horizontes de predicción mayores.

Los resultados que se muestran en las tablas sobre demoras en semáforos y tiempos de espera corresponden a promedios. Estos promedios se calcularon sobre varias repeticiones de un mismo caso, pero dada la aleatoriedad del predictor en algunas ocasiones las soluciones cambian. En un número importante de las repeticiones se obtuvieron valores mucho más bajos que el promedio; esto indica que si el predictor logra ser ajustado se pueden obtener soluciones mejores y más estables.

Dadas las altas desviaciones estándar que se obtuvo, se optó por mantener la velocidad de los vehículos privados constante, o con un ruido igual a cero, esto ayudó a reducir las varianzas, lo cual, más que una aproximación a la realidad es una medida para aumentar la confiabilidad en los resultados.

En la Tabla 5.1 se muestra un resumen con los resultados en tiempos de espera y demoras en semáforos de todas las sensibilizaciones, mientras que en la Tabla 5.2 se muestran los resultados para la desviación estándar de los intervalos entre buses.

Tabla 5.1 Resumen sensibilidad de demoras y esperas.

	Valor del parámetro a sensibilizar		
SENSIBILIDAD A δ_B	0.5	1	10
espera promedio pasajeros	4.94	4.9	4.88
demora promedio de bus en semáforo	1.07	1.1	0.98
demora promedio de autos en semáforos	0.78	0.78	0.83
SENSIBILIDAD A DEMANDA	80%	100%	120%
espera promedio pasajeros	5.21	4.9	5.09
demora promedio de bus en semáforo	0.94	1.1	0.99
demora promedio de autos en semáforos	0.44	0.78	1.12
SENSIBILIDAD A HORIZONTE DE PREDICCIÓN	1	2	3
espera promedio pasajeros	4.85	4.93	4.9
demora promedio de bus en semáforo	2.44	1.31	1.1
demora promedio de autos en semáforos	0.63	0.75	0.78

Las diferencias entre resultados mostradas en la Tabla 5.1 son menores. Esto se debe a que se está sensibilizando en un sistema que ya está controlado. En esta situación no se pueden esperar mejoras sustanciales entre acciones de control distintas.

La mayor sensibilidad se tiene para el horizonte de predicción, donde un paso más puede significar un 16% de disminución de las demoras. Sin embargo, un horizonte de predicción mayor aumenta los tiempos de ejecución, además por cada paso extra en la predicción se agrega error extra, puesto que cada vez la predicción es más lejana a la información real.

Por otra parte, los tiempos de espera en paraderos se mantienen en valores similares.

Tabla 5.2. Resumen sensibilidad de intervalos.

	Valor del parámetro a sensibilizar		
SENSIBILIDAD A δ_B	0.5	1	10
H_desvest	3.87	3.87	3.76
SENSIBILIDAD A DEMANDA	80%	100%	120%
H_desvest	3.78	3.87	3.68
SENSIBILIDAD A HORIZONTE DE PREDICCIÓN	1	2	3
H_desvest	3.83	3.87	3.87

5.2 Factibilidad de Implementación.

Se ha probado que la estrategia de control con semáforos combinada con las estrategias de control de buses en paraderos, es decir *holding* y *station skipping*, permiten disminuir los tiempos de espera en paraderos, demoras en semáforos y regularidad de intervalos. Sin embargo, estos resultados son producto de una simulación simplificada, en una red pequeña y con supuestos de por medio. Esto abre la interrogante de si es posible replicar estos resultados en un sistema real, y de ser posible, que se requiere para lograrlos.

En primer lugar, uno de los requerimientos del sistema es que los buses circulen aislados de los vehículos privados, es decir en un corredor. Esto es perfectamente factible y de hecho muchos sistemas de transporte público funcionan de esta forma, aunque significa una importante inversión en infraestructura vial.

También en el ámbito de la infraestructura entra la tecnología necesaria para la detección, uno de los supuestos que se hizo es que son conocidas las demoras y las longitudes de cola en los arcos. La demora se puede estimar usando detectores, como los que actualmente se usan en los semáforos actuados, de manera que permitan estimar la diferencia de tiempo entre las pasadas por distintos detectores de un mismo auto, además de su velocidad. Para las longitudes de cola pueden usarse detectores como los mencionados, o cámaras en las intersecciones que permitan obtener el largo exacto de la cola. Esta tecnología existe actualmente, pero su implementación a gran escala ciertamente puede tener un costo poco accesible.

Los buses requieren de tecnología similar, pero en su caso la detección puede implementarse vía sensores propios del bus, ya sea mediante *GPS* o *transponders*, que permiten conocer su posición en cada momento. Los buses requieren además tecnología para estimar las tasas de ocupación, es de decir, la cantidad de pasajeros que transportan los buses. Para esto existen varias formas, pueden estar ligadas al medio de pago, por un sistema de tarjetas y validadores; mediante la instalación de contadores de personas en las subidas y bajadas de los buses; por último una forma más avanzada es el procesamiento digital de imágenes, mediante cámaras en el interior de los buses que permitan reconocer el total de pasajeros. La información más difícil de obtener en el caso de transporte público, es el destino de los pasajeros que están abordo. Sin embargo, se puede tener una buena aproximación usando identificadores que pueden insertarse en los medios de pago por tarjeta, donde tales indicadores están asociados a una base de datos que indica los destinos frecuentes que ha tenido cada tarjeta. También se requiere, en el caso de utilizar demanda histórica, matrices origen-destino, estas matrices se pueden obtener por medio de encuestas a gran escala

Probablemente el tema más delicado es el de la predicción de demanda de transporte privado, es decir, la parte del sistema que predice los autos que entrarán, por donde entrarán y cuando entraran, además de las rutas que seguirán dentro de la red. Este es un problema complejo, pues se requiere que el predictor ayude a mantener la estabilidad del control. En los datos de los anexos se puede ver que las demoras y tiempos de espera alcanzan en ocasiones valores bastante más bajos a los promedio.

Esto indica que existe la potencialidad de que un predictor más elaborado pueda mejorar bastante estos resultados.

6 Conclusiones.

Por lo general, las estrategias de prioridad en semáforos se evalúan de forma separada a las estrategias en paraderos. En este trabajo se logró integrar ambas estrategias en un solo sistema de control. Otra particularidad del trabajo realizado en esta memoria es que la discretización de tiempo se basó en la ocurrencia de eventos, lo cual implica que el sistema se actualiza a un paso variable, a diferencia de la mayoría de los enfoques, donde el tiempo se discretiza a un paso fijo definido a priori por el controlador.

Se desarrolló una estrategia de control para semáforos que permite ceder prioridad a los buses. Adicionalmente permite contabilizar el efecto que dicha prioridad tiene en el resto de los agentes del sistema, los usuarios de transporte privado.

Una parte importante del trabajo consistió en el diseño de un simulador de tráfico, lo suficientemente simple como para hacer aceptables los tiempos de ejecución, pero que permitió obtener parámetros relevantes para la optimización, tales como demoras y tiempos de viaje para vehículos privados. Lo anterior, sumado al trabajo realizado en Sáez et al (2007) hizo posible estimar estas mismas variables para los usuarios de transporte público.

El control de los semáforos redujo considerablemente los tiempos de espera en semáforos de los buses. Esto no sólo reduce los tiempos de viaje, sino que minimiza la perturbación de los semáforos, ayudando a aumentar la eficacia de las estrategias de *holding* y *station skipping*, lo cual contribuye a reducir los tiempos de espera en paraderos vía regulación de los intervalos entre buses.

De los resultados se desprende que las estrategias de *holding* y *station skipping* funcionan mejor si se les acompaña de prioridad en semáforos. Esto se traduce en las disminuciones en los tiempos de espera y demoras en semáforos que se observaron. Claramente esto es consecuencia del control de semáforos, ya que no existen otros cambios de por medio. Por otro lado, el control de semáforos por si solo no logra reducir los tiempos de espera en paraderos, sino solamente las demoras en semáforos.

Por el contrario, y como se esperaba, las demoras de los vehículos privados sufrieron un aumento, el cual no fue significativo en todos los experimentos que se realizó, más bien depende de la importancia relativa que se da a cada tipo de vehículo y en mayor medida de la distribución de demanda en la red. Debido a esto, un aumento en el flujo de autos no necesariamente genera pérdidas para los buses, ya que gran parte del flujo privado comparte la fase prioritaria con los buses.

El análisis de la sensibilidad realizado en el capítulo 6 sugiere que la aplicación de una estrategia como la desarrollada en este trabajo puede traer beneficios sin importar la magnitud de la demanda de transporte privado.

Se pueden alcanzar beneficios en tiempos de ejecución relativamente pequeños, puesto que los tiempos de espera en paraderos y demoras en semáforos disminuyen un 46% al pasar del horizonte de predicción de un paso al de dos pasos.

Sin embargo, esta reducción es de sólo 16% al pasar de dos a tres pasos, la reducción total a partir de la condición sin control es de un 56%. Por lo anterior, no es recomendable ni necesario usar un horizonte de predicción muy amplio, pues se ganaría poco en tiempos de espera y demoras, pero los tiempos de ejecución crecerían bastante.

Por otro lado, y como se mostró en el capítulo 5, la espera en los paraderos también disminuye, logrando una disminución de 47% sobre la situación sin control, y de 24% sobre la situación con control de buses únicamente. Por su parte, la regularidad de intervalos también mejora, aunque en una proporción bastante menor.

Los parámetros de control deben ser ajustados a la situación particular que se desea controlar, por lo tanto, los resultados mostrados en este esquema simplificado no son determinantes en este sentido.

Por lo anterior se concluye que se ha cumplido el objetivo principal, optimizar el funcionamiento de una flota de buses mediante una estrategia integrada, puesto que la estrategia implementada efectivamente disminuye en gran medida los tiempos de espera en paraderos y demoras en semáforos. Por otro lado, las herramientas que se han generado, en conjunto con las ya existentes, permitirán continuar la investigación en esta área.

7 Trabajo Futuro.

7.1 Extensión a Redes.

La red con la que se trabajó es apropiada para identificar y aislar los efectos de distintas estrategias de control, lo cual es útil desde el punto de vista de la investigación. Sin embargo, no se trata de una red real sino de una simplificación con flujos razonables, pero no se acerca a una situación real.

En muchos aspectos la red es bastante pequeña, sólo cuenta con dos semáforos, y diez buses que solamente circulan por el corredor. Además los vehículos privados sólo cuentan con una ruta posible dado su par origen destino. Sería interesante simular intersecciones de corredores, en donde circulen buses en ambas fases. Esto requeriría de una red más extensa, con más corredores, más semáforos e incluso la inclusión de intersecciones de prioridad.

Lo anterior haría más complejo el problema de ruteo de los vehículos privados, ya que en una red más grande existen varias posibilidades de rutas para un mismo par origen destino. Es decir, en este caso la fase de asignación del transporte privado cobra más importancia. Sin embargo, como la formulación desarrollada no está ligada a la asignación, la función objetivo puede seguir siendo aplicable.

7.2 Modelamiento del Proceso.

Como se mencionó en capítulos anteriores, se han hecho supuestos para simplificar la dinámica del problema, por ejemplo: velocidad constante, para buses y autos, buses aislados de los autos mediante corredores. Tampoco se tomó en cuenta la diferencia que existe entre realizar un viraje a la derecha, a la izquierda o seguir derecho.

El objetivo de tales supuestos es no tener que incluir las múltiples y complejas interacciones físicas que se dan entre los vehículos. De igual manera se asumió que no existía congestión en la red.

El modelamiento de las interacciones físicas permitiría simular adelantamiento de vehículos, bloqueos de calles y reducción de la velocidad al aumentar la congestión. Esto puede tener efectos significativos, puesto que el control de semáforos tiene mayor aplicación en casos de alta demanda.

7.3 Mejoras a la Predicción.

El predictor utilizado en este trabajo se basa en la estimación de probabilidades de entrada a la red y de viraje, calculadas con los datos de los últimos eventos registrados. Esto permite identificar situaciones de tráfico anormales y actuar de manera de corregirlas.

Este enfoque no tiene forma de ver hacia adelante, pues la información que tiene es sólo la actual. Sin embargo, se puede usar información histórica, de días anteriores

por ejemplo, que permita calcular probabilidades *offline*. La información *online* y *offline* pueden mezclarse usando distintos ponderadores, los cuales dependen del controlista y de lo que se quiera lograr. Esto puede ayudar a que la predicción sea más estable.

Por último, la creación de un predictor de demanda de transporte privado eficiente es un tema en sí mismo, y como se ha visto puede mejorar bastante los resultados del control en lo que a estabilidad se refiere.

7.4 Estrategias de Planificación de Flota.

Existe otro tipo de estrategias aparte de las que se han expuesto en este trabajo. Tales estrategias no buscan acelerar o detener a los buses que se encuentren con problemas de itinerario. Estas estrategias inyectan buses en la red que realizan recorridos distintos al prefijado.

Se conocen como estrategias de planificación de flota e incluyen la estrategia de bucles, que consiste en inyectar buses que realizan recorridos solo entre ciertos paraderos de la red, y la estrategia de *deadheading*, en la cual los buses se saltan parte de su recorrido para servir más rápido las zonas más cargadas.

7.5 Algoritmos Evolutivos.

Un requerimiento importante cuando se realiza control en tiempo real es que los tiempos de ejecución sean bajos, de manera que puedan ser implementados a tiempo. Los algoritmos genéticos por ejemplo pueden ayudar a encontrar soluciones de manera más rápida que por enumeración explícita.

También pueden usarse si se realiza optimización multi-objetivo. Esta es una herramienta útil cuando se tienen, objetivos en oposición, en este caso el tiempo de espera de los usuarios privados versus el tiempo de espera de los usuarios del sistema de transporte público.

Algo más avanzado es resolver el problema con algoritmos genéticos en lugar de enumeración explícita, y luego usarlo para entrenar redes neuronales, que dadas las condiciones de tráfico estimen la acción de control más conveniente a realizar. Esto es análogo a tener una función cuyas entradas son las condiciones de tráfico y sus salidas las acciones de control.

8 Bibliografía y Referencias.

- Balke,K., Dudek, C., Urbanik,T. (2000). Development and Evaluation of an intelligent bus priority concept. **79th Annual Meeting Transportation Research Board.**
- Davol, A. (2001). Modeling of Traffic Signal Control and Transit Signal Priority Strategies in a Microscopic Simulation Laboratory. **Tesis para optar al grado de Master of Science in Transportation. Massachusetts Institute Of Technology.**
- Diakaki, C., Papageorgiou, M., Abdoulas, K. (2002). A multivariable regulator approach to traffic-responsive network wide signal control.**Control Engineering practice 10 (2002),pp 183-195.**
- Dion, F., Hellinga, B. (2002). A rule-based real-time traffic responsive signal control system with transit priority: application to an isolated intersection. **Transportation Research. Vol. 36B, No. 1, 2002, pp. 325-343.**
- Duerr, P. (2000). Dynamic right-of-way for transit vehicles: an integrated modeling approach for optimizing signal control on mixed traffic arterials. **79th Annual Meeting Transportation Research Board.**
- Felici, G., Rinaldi, G., Sforza, A., Truemper, K. (2006). A logis programing based approach for on-line traffic control. **Transportation Research Part C 14 (2006), pp. 175-189.**
- Furth, P.G., T.H.J. Muller (2000). Conditional Bus Priority at Signalized Intersections: Better Service Quality with Less Traffic Disruption. **Transportation Research Record 1731, pp. 23-30.**
- Gartner. N.H. (1983). OPAC: a demand-responsive strategy for traffic signal control. **Transportation Research Board 1983, pp. 75-81.**
- Head, L. (1995). Event-based short-term traffic flow prediction model. **Transportation Research Record 1510, pp 45-52.**
- Kim, W., Rilett, L.R. (2005). An improved transit signal priority system for networks with nearside bus stops. **Transportation Research Board 84th Annual Meeting, Washington, D.C.**
- Lee, J., Shalaby, A., Greenough, J., Bowie, M., Hung, S. (2005). Advanced transit signal priority control using on-line microsimulation-based transit prediction model. **84th Annual Meeting of the Transportation Research Board.**
- Li, M., Yin, Y., Zhuo, K., Zang, W., Liu, H., Tan, C. (2005). Adaptive transit signal priority on actuated signalized corridors. **84th Annual Meeting of the Transportation Research Board.**
- Osuna E. E., Newell G. F. (1972). Control strategies for an idealized public transportation system. **Transportation Science 6, pp. 52-72.**
- ROESS, Roger P. PRASSAS, Elena S.MCSHANE, William R.Basic Principles of Intersection Signalization. En su:**TRAFFIC ENGINEERING. Third edition. Estados Unidos, Pearson Prentice Hall, 2004. pp. 470-499.**
- ROESS, Roger P. PRASSAS, Elena S.MCSHANE, William R.Basic Signal Coordination for Arterials and Networks. En su:**TRAFFIC ENGINEERING. Third edition. Estados Unidos, Pearson Prentice Hall, 2004. pp. 684-725.**

- Sáez, D., Cortés, C., Sáez, E., Riquelme, M., Núñez, A., Tirachini, A. (2007) Hybrid Predictive Control Strategy for a Public Transportation System with Uncertain Demand. **Enviada a revisión al Special Issue Selected papers from the Triennial Symposium on Transportation Analysis (TRISTAN), Transportation Research, Part C.**
- Skabardonis, A. (2000). Control strategies for transit priority. **79th Annual Meeting Transportation Research Board.**
- Spyropoulou, I. (2007). Modelling a signal controlled traffic stream using cellular automata. **Transportation Research Part C 15 (2007) 175-190.**
- Wadjas, J., Furth, P.G. (2003). Transit signal priority along an arterial using advanced detection. **Transportation Research Board 2003.**
- Yagar, S., B. Han. (1993). A procedure for real-time signal control that considers transit interference and priority. **Transportation Research, Vol. 28B, No.4, 1993, pp. 315-331.**

Anexos.