



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos

Tesis Doctoral

**Diseño y optimización de un modelo matemático
para la transición entre el cambio de planes de los
tiempos de reparto de los semáforos**

Autor

RITA PATRICIA PEÑABAENA NIEBLES

Directores

JOSE LUIS MOURA BERODIA

VICTOR CANTILLO MAZA

Santander, 2015

A Dios mi protector y a mi madre y hermanos por siempre creer en mí

RESUMEN

Durante décadas, la creciente demanda de transporte y el consecuente incremento en los flujos de tráfico en las ciudades ha exacerbado las externalidades asociadas: congestión, retrasos, colas, aumento del tiempo de viaje, accidentes y problemas ambientales. En respuesta, uno de los principales objetivos del Control de Tráfico Urbano es mejorar la progresión en los corredores; de ahí, que este se ha convertido en una de las principales herramienta para aliviar los problemas del tráfico y mejorar la movilidad en las ciudades. La coordinación de las señales de tráfico y optimización de planes de semaforización, junto con mejoras en la fase de transición son algunos de los instrumentos que se utilizan para lograr esta meta.

La fase de transición se define como el proceso de cambiar de un plan de semaforización o de tiempos de semáforos a otro. Este proceso puede incluir cambios en el desfaseamiento (*offset*), en los tiempos de verde y/o en la duración del ciclo hasta que se alcanza plena coordinación con el nuevo plan. Como se ha señalado en la literatura, la transición o cambio entre los planes de tiempo de los semáforos pueden conducir a graves interrupciones en el flujo de tráfico provocando congestión y costos asociados con el tiempo adicional de viaje, el consumo de combustible y las emisiones de gases contaminantes a la atmosfera.

A pesar de la importancia del desempeño de la transición, hay un número limitado de estudios dirigidos a la optimización de la eficacia de las medidas operativas durante este periodo utilizando modelos matemáticos. Éstos incluyen sólo una medición de la eficiencia como objetivo de optimización, lo cual es visto como una una desventaja ya que se requieren métodos más rigurosos, que permitan ejecuciones que se asemejen a las condiciones existentes. En consecuencia, hay una oportunidad para diseñar nuevos modelos matemáticos que proporcionen soluciones al problema de la transición al optimizar simultáneamente más de una medida de eficiencia mediante el uso de técnicas de solución avanzadas.

En atención al problema descrito, la presente investigación propone el diseño de un modelo matemático no lineal para mejorar el rendimiento de la transición entre los planes de frecuencia de la señal en las intersecciones coordinadas. El modelo

comprende la minimización de una función de costos sociales, que incluye una reducción en la demora, las emisiones de gases y el consumo de combustible, considerando múltiples objetivos que adoptan más medidas de efectividad. Para resolver el modelo matemático se diseña un algoritmo (heurística) de colonia de hormigas que permite encontrar los parámetros óptimos de coordinación durante la fase de transición. Además la evaluación de la eficacia del nuevo modelo, su validez y utilidad se han comprobado mediante su aplicación en dos casos de estudios y un caso real para un corredor en la ciudad de Santander. Esta evaluación se realizó sobre la base de la capacidad del modelo para reducir al mínimo los retardos, las emisiones de contaminación del aire y el consumo de combustible. El modelo es eficiente en tanto que permite reducir los costos sociales asociados con el período de transición.

El principal aporte de esta investigación corresponde al diseño de un modelo matemático que permite cuantificar el impacto en términos monetario de la transición entre planes de semaforización para los usuarios y el medio ambiente. Tanto el modelo matemático, como la función costo social diseñada se constituyen en el primer paso para el desarrollo de estudios orientados a diseñar políticas de control de tráfico que tengan en cuenta un enfoque multiobjetivo, involucrando el componente ambiental.

Por último, esta investigación ha dado cabida al desarrollo de tres artículos sometidos para publicación en revistas indexadas de alto impacto, dos de los cuales fueron publicados, y el tercero esta en primera revisión por parte de pares. Las publicaciones citadas son reflejo del aporte y contribución de esta investigación para la comunidad científica.

ABSTRACT

For decades the growing demand for transport and road traffic in cities has led to congestion, delays, queues, increased travel time, accidents and environmental problems. One of the main objectives of Urban Traffic Control is to improve the progression along corridors; hence, this has become a major tool to alleviate traffic problems and improve mobility in cities. Coordination of traffic signals and traffic lights optimization plans, as well as, improvements in the transition phase are some of the tools used to achieve this goal.

The transition phase is defined as the process of changing from one traffic-timing plan to another; this process may include changes in the *offset*, green time or cycle length until coordination with the new plan is reached again. As noted in the literature, the transition or change between timing plans may lead to serious disruptions in traffic flow causing congestion and extra costs associated with additional travel time, fuel consumption and emissions of polluting gases into the atmosphere.

Despite the importance of the transition performance, there are a limited number of studies aimed at optimizing the efficiency of operational steps during this period through mathematical models. These studies only include one efficiency measurement in the optimization objective, which can be seen as a disadvantage, as methods that are more complex are required to resemble existing conditions. Consequently, there is an opportunity to design new mathematical models that provide solutions to the transition problem by simultaneously optimizing more than one measure of efficiency using advanced solution techniques.

For this reason, this research proposes the design of a nonlinear mathematical model to improve the performance of the transition between signal frequency plans in coordinated intersections. The model includes the minimization of a social cost function that incorporates a reduction in delay, gas emissions and fuel consumption, considering multiple objectives that adopt more effectiveness measures. To solve the mathematical model, an ant colony algorithm is designed to find the optimal coordination parameters during the transition phase. In addition, the new model

effectiveness, its validity and usefulness have been proven through its application in two case studies and a real case of a traffic corridor in the city of Santander. This assessment was made based on the model's ability to minimize delays, emissions of air pollution and fuel consumption and its effectiveness in reducing the social costs associated with the transition period.

The main contribution of this research corresponds to the design of a mathematical model that quantifies in monetary terms the impact of the transition between traffic plans to users and the environment. Both the mathematical model and the social cost function constitute the first step in the development of studies to design traffic control policies that take into account a multi-objective approach that includes an environmental component.

Finally, this research has led to the development of three scientific papers that have been submitted for publication in high impact indexed journals, two of which were published, and the third one is currently undergoing the first review stage. The above shows the contribution of this research to the scientific community.



AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer la culminación de esta Tesis Doctoral a todas aquellas personas que me han apoyado a lo largo de este proceso y sin las cuales no hubiera sido posible lograr este objetivo.

En primer lugar mi agradecimiento a mis directores de tesis, D. José Luis Moura Berodia y D. Victor Cantillo Maza no sólo por ofrecerme sus valiosos conocimientos y experiencia profesional, sino también por animarme y alentarme en cada una de las fases de la investigación. Quiero agradecer también a D. Borja Alonso por toda la información suministrada, por su disponibilidad y colaboración en este trabajo.

Un agradecimiento especial a mis amigos y colegas del Área de Transportes de la Universidad de Cantabria, por facilitarme la integración y hacerme sentir una compañera más durante mi estancia con el grupo de investigación.

Gracias al ingeniero Javier Páez Saavedra por haber creído en mis capacidades y por todo el apoyo brindado durante este largo proceso.

Mi agradecimiento también al Departamento Administrativo de Ciencias, Tecnología e Innovación-COLCIENCIAS y a la Universidad del Norte, especialmente a la Dirección de Gestión y Desarrollo Académico a través del programa de Desarrollo Profesional, por haber aportado los recursos que me permitieron lograr esta meta.

No puedo olvidar a todos mis amigos de la Universidad del Norte que me han acompañado y sufrido conmigo tantos las alegrías como las tristezas a lo largo de este camino, gracias por su continuo apoyo y escucha.

Quiero agradecer a toda mi hermosa familia por su apoyo constante e incondicional, por siempre creer en mí y ser mi fuente de inspiración.

Por último, a Adrián, por su comprensión, paciencia, cariño y amor.

A todos mi eterno agradecimiento.

¡Gracias!





ÍNDICE DE CONTENIDO

| | |
|--|------|
| RESUMEN | i |
| ABSTRACT | iii |
| AGRADECIMIENTOS | vii |
| ÍNDICE DE CONTENIDO | ix |
| ÍNDICE DE FIGURAS | xiii |
| ÍNDICE DE TABLAS | xv |
| 1. INTRODUCCIÓN | 3 |
| 1.1. Antecedentes | 3 |
| 1.2. Motivación y planteamiento del problema | 7 |
| 1.3. Objetivos de investigación, premisa central e hipótesis | 12 |
| 1.4. Estructura de la tesis | 13 |
| 1.5. Aportaciones | 14 |
| 2. ANÁLISIS DE LA PROBLEMÁTICA DE LA TRANSICIÓN ENTRE LOS PLANES DE TIEMPO DE LOS SEMAFOROS | 19 |
| 2.1. Introducción | 19 |
| 2.2. Metodología para la clasificación y análisis | 22 |
| 2.3. Marco de clasificación | 22 |
| 2.4. Los Métodos de transición | 26 |
| 2.4.1. Enfoque en el estudio de la transición | 26 |
| 2.5. Resultados y discusión | 35 |
| 2.5.1. ¿Cuál es el enfoque en el estudio de la transición? | 35 |
| 2.5.2. ¿Cuál es el propósito de la investigación? | 38 |
| 2.5.3. ¿Cuál es el modo de operación? | 39 |
| 2.5.4. ¿Cuál programa o herramienta de simulación es usado? | 40 |
| 2.5.5. ¿Cuáles Métodos de Transición son usados? | 41 |
| 2.5.6. ¿Cuáles controladores son usados? | 42 |
| 2.6. Encuestas de validación con expertos | 44 |
| 2.7. Conclusiones parciales | 48 |
| 3. ANALISIS DE MODELOS PARA LA FUNCIÓN COSTO SOCIAL | 53 |
| 3.1. Introducción | 54 |
| 3.2. Modelos para la demora | 58 |
| 3.3. El Modelo de demora de HCM 2000 | 62 |



| | | |
|--------|--|-----|
| 3.4. | Consumo de combustible | 70 |
| 3.5. | Modelo de Consumo de Combustible de Akçelik | 72 |
| 3.6. | Emisiones de gases a la atmósfera | 78 |
| 3.7. | Modelo de emisiones | 84 |
| 4. | DISEÑO Y EVALUACION DE LA FUNCIÓN COSTO SOCIAL BASADA EN LA DEMORA, CONSUMO DE COMBUSTIBLE Y EMISIONES DE GASES | 87 |
| 4.1. | Introducción | 88 |
| 4.2. | Diseño de la función costo social | 90 |
| 4.2.1. | Enfoque del modelo | 91 |
| 4.2.2. | Modelado para la demora | 94 |
| 4.2.3. | Modelado del Consumo de combustible y emisiones de gases a la atmósfera | 95 |
| 4.2.4. | Función matemática para cuantificar el costo social | 97 |
| 4.2.5. | Diseño de una heurística para determinar planes de transición | 98 |
| 4.3. | Evaluación del impacto de los tiempos de la transición el costo social | 100 |
| 4.4. | Discusión y análisis caso de estudio | 103 |
| 5. | DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE UN MODELO MATEMÁTICO PARA LA TRANSICION DE PLANES EN LOS TIEMPOS DE LOS SEMAFOROS. | 111 |
| 5.1. | Introducción | 112 |
| 5.2. | Diseño modelo matemático | 115 |
| 5.2.1. | Aproximaciones y consideraciones básicas del modelo | 116 |
| 5.2.2. | Formulación del problema | 117 |
| 5.2.3. | Variables del problema de transición y espacio de restricciones | 121 |
| 5.3. | Optimización de la colonia de hormigas | 122 |
| 5.3.1. | Preparar la colonia de hormigas | 123 |
| 5.3.2. | Construir un espacio de solución para la colonia de hormigas | 124 |
| 5.3.3. | Definir probabilidades | 127 |
| 5.3.4. | Seleccionar y evaluar los caminos | 128 |
| 5.3.5. | Actualizar feromonas | 128 |
| 5.4. | Caso de estudio | 128 |
| 6. | DISEÑO DE UN PLAN DE TRANSICIÓN ENTRE PLANES DE SEMAFORO: Caso Paseo General Dávila de la ciudad de Santander | 137 |
| 6.1. | Introducción | 138 |
| 6.2. | Situación actual red semafórica en estudio | 140 |
| 6.2.1. | Situación y emplazamiento | 140 |
| 6.2.2. | Red semafórica en estudio | 143 |



| | | |
|--------|---|-----|
| 6.2.3. | Planes de reparto actual | 145 |
| 6.2.4. | Simulación red semafórica actual | 148 |
| 6.3. | Optimización de los planes de reparto de los semáforos antes y después de la transición | 152 |
| 6.4. | Diseño de la transición entre Plan 31 y 51 para Paseo General Dávila | 157 |
| 6.4.1. | Construcción escenarios de transición | 158 |
| 6.4.2. | Discusión y análisis | 165 |
| 7. | CONCLUSIONES FINALES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN | 173 |
| 7.1. | Conclusiones | 174 |
| 7.2. | Futuras Líneas de Investigación | 177 |
| | Referencias | 183 |
| | Anexos | 191 |





ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|-----|
| Figura 1. Programación tiempos de semáforos según horas del día | 9 |
| Figura 2. Distribución histórica de artículos de acuerdo a su enfoque de transición..... | 38 |
| Figura 3. Distribución de artículos de acuerdo al enfoque en el estudio de la transición..... | 38 |
| Figura 4. Distribución de artículos de acuerdo al propósito de la Investigación. | 39 |
| Figura 5. Distribución de artículos de acuerdo con el modo de operación usado..... | 40 |
| Figura 6. Distribución de artículos de acuerdo con la herramienta de Simulación usada | 41 |
| Figura 7. Distribución de artículos de acuerdo con el método de transición usado..... | 42 |
| Figura 8. Distribución de artículos de acuerdo con el controlador usado. | 43 |
| Figura 9. Continentes y sectores encuestados..... | 45 |
| Figura 10. Distribución de respuestas de acuerdo con el modo de operación usado. | 46 |
| Figura 11. Distribución de respuestas de acuerdo con la herramienta de simulación usada.... | 46 |
| Figura 12. Distribución de respuestas de acuerdo con el método de transición usado. | 47 |
| Figura 13. Distribución de respuestas de acuerdo con el método de transición usado. | 47 |
| Figura 14. Diagrama que ilustra el comportamiento del espacio-tiempo en una intersección señalizada..... | 92 |
| Figura 15. Esquema de las intersecciones señalizadas | 101 |
| Figura 16. Costo del tiempo de acuerdo con el número de pasos n..... | 104 |
| Figura 17. Costo de operación del vehículo de acuerdo a los números de pasos n | 104 |
| Figura 18. Costo de emisión de gases de acuerdo con el número de pasos n..... | 105 |
| Figura 19. Costo social de acuerdo con el número de pasos n | 106 |
| Figura 20. Demora o retraso (segundos) de acuerdo con el número de pasos n | 106 |
| Figura 21. Diagrama de flujo de un algoritmo de optimización de Colonia de Hormigas propuesto | 124 |
| Figura 22. Función exponencial para la interpolación de sub matrices..... | 126 |
| Figura 23. Esquema arteria con tres intersecciones para el caso de estudio | 129 |
| Figura 24. Esquema para cada intersección señalizada en el caso de estudio | 129 |
| Figura 25. Convergencia ACO de acuerdo con el número de hormigas..... | 132 |
| Figura 26. Convergencia ACO de acuerdo con el número de interacciones..... | 132 |
| Figura 27. Situación del término municipal de Santander. | 141 |
| Figura 28. Densidad de población en los distritos del municipio de Santander. | 141 |
| Figura 29. Modos de transporte para la población activa de la ciudad de Santander. | 142 |
| Figura 30. Mapa de líneas de la ciudad de Santander. | 143 |
| Figura 31. Delimitación red caso de estudio: Paseo General Dávila..... | 144 |
| Figura 32. Cruces en estudio red semafórica Paseo General Dávila. | 144 |
| Figura 33. Movimientos asociados a cada fase para la intersección 3080. | 148 |
| Figura 34. Vistas de tramos parciales red Paseo General Dávila. | 149 |
| Figura 35. Vista 3D tramo parcial red Paseo General Dávila..... | 149 |
| Figura 36. Recta de regresión prueba de ajustes datos de la demanda. | 152 |
| Figura 37. Relación demanda datos reales con datos ajustados. | 152 |
| Figura 38. Red en SYNCHRO Paseo General Dávila. | 153 |
| Figura 39. Optimización en SYNCHRO plan de repartos 31 para Paseo General Dávila. | 154 |
| Figura 40. Intersección Paseo General Dávila-Calle Alonso Vega | 169 |





ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|-----|
| Tabla 1. Artículos desarrollados con simulación basada en emulación en bucle | 29 |
| Tabla 2. Artículos desarrollados con simulación basada en <i>software</i> en bucle..... | 30 |
| Tabla 3. Artículos desarrollados con simulación basada en <i>hardware</i> en bucle | 32 |
| Tabla 4. Artículos revisados (1974-2012)..... | 36 |
| Tabla 5. Lista de preguntas y posibles respuestas | 37 |
| Tabla 6. Datos de tiempos óptimos de la arteria antes de la transición..... | 101 |
| Tabla 7. Datos de tiempos óptimos de la arteria después de la transición | 101 |
| Tabla 8. Tasas y consumo de combustible y emisiones de gases de acuerdo con el modo de conducción y tipo de vehículo..... | 102 |
| Tabla 9. Plan de transición para 6 períodos o etapas de transición. | 103 |
| Tabla 10. Notación modelo matemático..... | 120 |
| Tabla 11. Datos de tiempos óptimos de la arteria antes de la transición..... | 130 |
| Tabla 12. Datos de tiempos óptimos de la arteria después de la transición | 130 |
| Tabla 13. Tasas y consumo de combustible y emisiones de gases de acuerdo con el modo de conducción y tipo de vehículo..... | 131 |
| Tabla 14. Plan de transición óptimo..... | 133 |
| Tabla 15. Resultados simulación para diferentes escenarios de transición para el caso de estudio..... | 134 |
| Tabla 16. Ubicación cruces en el tramo en estudio. | 145 |
| Tabla 17. Lista horaria de planes para la sub-área 101..... | 145 |
| Tabla 18. Planes de reparto actual para los cruces 3210-3190-3170-3160..... | 146 |
| Tabla 19. Planes de reparto actual para los cruces 3140-3270-3130-3120..... | 147 |
| Tabla 20. Planes de reparto actual para los cruces 3080-3090-3070-3060..... | 147 |
| Tabla 21. ID espiras General Dávila..... | 151 |
| Tabla 22. Planes de reparto optimizados para los cruces 3210-3190-3170-3160 | 154 |
| Tabla 23. Planes de reparto actual para los cruces 3140-3270-3130-3120-3080-3090-3070-3060 | 155 |
| Tabla 24. Medidas de desempeño Plan 31 actual versus optimizado | 156 |
| Tabla 25. Medidas de desempeño Plan 51 actual versus optimizado | 157 |
| Tabla 26. Plan de transición inmediata basado en planes actuales..... | 158 |
| Tabla 27. Plan de transición inmediata basado en planes actuales..... | 159 |
| Tabla 28. Plan de transición inmediata basado en planes óptimos..... | 159 |
| Tabla 29. Plan de transición inmediata basado en planes óptimos..... | 160 |
| Tabla 30. Plan de transición dos ciclos basado en planes óptimos..... | 160 |
| Tabla 31. Plan de transición dos ciclos basado en planes óptimos..... | 161 |
| Tabla 32. Plan de transición tres ciclos basado en planes óptimos | 162 |
| Tabla 33. Plan de transición propuesto basado en planes óptimos | 163 |
| Tabla 34. Plan de transición propuesto basado en planes óptimos | 164 |
| Tabla 35. Tasas y consumo de combustible y emisiones de gases según modo de conducción y tipo de vehículo..... | 166 |
| Tabla 36. Resultados demora y tiempo total de viaje para el sistema en estudio | 166 |
| Tabla 37. Resultados costo social para el sistema en estudio | 167 |
| Tabla 38. Resultados demora y tiempo total de viaje para calle principal | 168 |
| Tabla 39. Resultados costo social para calle principal | 168 |
| Tabla 40. Resultados demora y tiempo total de viaje para calles secundarias | 169 |



| | |
|---|-----|
| Tabla 41. Resultados costo social para calles secundarias..... | 169 |
| Tabla 42. Resultados demora y tiempo total de viaje para intersección Paseo General Dávila-Alonso Vega..... | 170 |
| Tabla 43. Resultados costo social para intersección Paseo General Dávila-Alonso Vega..... | 170 |



Capítulo 1 INTRODUCCIÓN





1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

Según el Informe de Movilidad Urbana de 2012, los niveles de congestión de tráfico se han incrementado en los últimos 30 años en las zonas urbanas de los Estados Unidos, y estas cifras son más alarmantes para las regiones con mayor población (Schrank, Eisele, & Lomax, 2012). En 2011, el retardo o demora total para todos los viajeros en las zonas urbanas de los Estados Unidos llegó a 4,8 mil millones de horas, cuatro veces más de lo obtenido en 1982. El efecto más significativo de la congestión en el tráfico vehicular es el costo asociado con el tiempo de viaje adicional, el consumo de combustible y las emisiones de gases. La cantidad de combustible desperdiciado debido a la congestión fue de 1.9 mil millones de galones en 2011 y el costo total de la congestión llegó a \$101 billones de dólares.

Por su parte, para los estados de la Unión Europea, se estima que el costo de la congestión vial es más de \$110 billones de euros al año, equivalente al 1% del producto interno bruto total, con una demora media en las vías urbanas de 16,6 segundos por kilómetro, siendo este problema más agravado para países como Irlanda, Reino Unido,



Polonia y Hungría, identificados como los estados miembros donde la congestión local/urbana es más alta (MOVE, 2014). La tendencia no es alentadora, un estudio recientemente realizado por el Centre for Economics and Business Research (2014) en Londres, concluye que para el 2030 el costo anual por congestión en Europa aumentara en promedio a \$293 billones de euros.

Adicionalmente, el uso del transporte es un importante contribuyente a las emisiones de gases de efecto invernadero totales (GEI). El sector del transporte contribuye con el 29% de las emisiones totales de gases de efecto invernadero de Estados Unidos, 25% de las emisiones de Europa y más del 5% de las emisiones de GEI en el mundo (Christidis & Rivas, 2012; U.S. Department of Transportation, 2010)

Las agencias federales, estatales y locales de transporte han estado trabajando en la mitigación de las posibles causas de la congestión del tráfico. El Informe de Movilidad Urbana (Schrank & T. J. Lomax, 2011), define cuatro estrategias para abordar el problema:

- Aumentar capacidad mediante la adición de más carriles de tráfico, rutas de autobuses adicionales o redes de diseño mejoradas. Esta estrategia es la más utilizada, y es la solución más fácil para manejar el incremento de la demanda vehicular y evitar el incremento en la congestión. No obstante, la experiencia demuestra que incrementar capacidad de la infraestructura también incentiva el uso del auto, por lo cual en el mediano plazo los problemas de congestión resurgen. Han mostrado mayor eficiencia las medidas que apuntan a mejorar la oferta de transporte público.
- Gestionar y aplicar métodos para reducir la demanda en horas pico. Esta estrategia puede implicar la incorporación de la bicicleta y los elementos peatonales, mejoras en las estrategias de estacionamiento antes de construir un proyecto urbanístico, alternación de horarios o cobros por congestión. Las políticas de gestión de la demanda, cada vez más populares, son instrumentos que apuntan a racionalizar el uso del vehículo.
- La congestión vehicular puede ser causada por el mantenimiento del sistema vial, tales como la adición de más carriles en las intersecciones, o en los sitios de construcción, por lo que una mejor gestión de estos proyectos puede reducir la



congestión. Por esta razón, es importante lograr que la fase de construcción y mantenimiento se desarrolle en las horas donde el volumen de tráfico es bajo.

- La última estrategia es incrementar la eficiencia de los sistemas de transporte mediante el uso de herramientas que permitan realizar mejoras en las intersecciones; tales como señales de tráfico, y las rampas de entrada de la autopista, etc. Todas estas herramientas están orientadas a mejorar la movilidad durante las horas pico. Estas estrategias resultan en bajos costos y altos beneficios.

Gran parte de las investigaciones (Han, 1996; Kwak, Park, & Lee, 2012; Li, Li, Pang, Yang, & Tian, 2004) dirigidas a aumentar la eficiencia de los sistemas de transporte se refieren a la optimización de semáforos. Mejorar las intersecciones semaforizadas es una de las estrategias más importantes para disminuir la congestión total, el tiempo de viaje, la demora, las emisiones contaminantes y el consumo de combustible. Los estudios han demostrado que los ahorros en el tiempo de viaje y consumo de combustible obtenidos de la implementación de programas de reajustes en los tiempos de los semáforos producen beneficios que justifican los costos asociados con este tipo de programas. Estos estudios están orientados hacia la operación de los semáforos, especialmente la optimización en el reparto de los tiempos, buscando mejorar los niveles de servicio en atención a la demanda vehicular.

Para tal efecto, una de las estrategias más importantes que se utilizan para mejorar el flujo de tráfico en las calles arteriales es la coordinación entre las señales de tráfico o semáforos entre las intersecciones. La coordinación permite que un grupo o pelotón de vehículos se muevan a través de varias señales minimizando las detenciones. Este movimiento continuo se conoce como progresión. Uno de los problemas de la coordinación se presenta cuando se hace necesario cambiar de un plan en los tiempos de semaforización a otro nuevo.

El proceso de cambiar de un plan de repartos en los tiempos de semaforización a otro se define como transición. El tiempo empleado por los semáforos de las intersecciones en adaptarse o sincronizarse a un nuevo plan se define como el período o fase de transición y se inicia cuando la primera señal de la intersección comienza ajustar los



planes y finaliza cuando la última intersección completa el ajuste en los repartos de los tiempos de la señal.

La transición entre los planes de los repartos de los tiempos de los semáforos es necesaria porque los patrones de tráfico son altamente dinámicos. Por esta razón, es relevante modificar los diferentes planes para los parámetros de tiempo de la señal para lograr cumplir con los cambios esperados en los volúmenes de tráfico. Esto implica el desarrollo de diferentes planes para los repartos de tiempo durante los diferentes períodos de demanda; pico de la mañana y de la tarde, períodos valle, fines de semana, noches, etc. (Ross, 1977)

La transición puede ser un medio importante para mejorar la eficiencia de los sistemas de semaforización en sus diferentes modos de operación, ya sea de acuerdo con la hora o tiempo del día (TOD según su sigla en inglés), mediante la selección del plan según el patrón de tráfico identificado en tiempo real (TRP según su sigla en inglés), o a través del control adaptativo o modo con preferencia, priorizando el tránsito de vehículos de emergencia o los servicios de transporte público.

La transición entre los planes de tiempo de los semáforos puede tener repercusiones positivas o negativas, causando incrementos o disminuciones en el tiempo de viaje, demoras, velocidad y paradas. Los impactos positivos se asocian con buenas estrategias durante la transición de la señal de tráfico e incluyen beneficios tales como mínimo tiempo de viaje y número de paradas que reduzcan las demoras, mínimo consumo de combustible y mínimas emisiones de gases a la atmósfera. Los efectos negativos pueden incluir una posible interrupción de la progresión del tráfico entre las intersecciones que resulta en altos niveles de congestión del tráfico. Por lo tanto, la importancia de la transición entre un plan de semaforización y otro nuevo está en minimizar las demoras, el consumo de combustible y las emisiones de gases contaminantes al aire durante la fase de transición.

No obstante la relevancia del problema, muy pocos estudios (Balke, Rao, & Husted, 1998); (Shelby, Bullock, & Gettman, 2006) se han dirigido a optimizar la transición entre planes de semaforización. La mayoría de los esfuerzos de investigación se han centrado en el desarrollo de planes en los repartos de tiempo de la señal a través de



mejores métodos de optimización y modelado de tráfico más realista (Park, Santra, Yun, & Lee, 2004). Estudios previos sobre la optimización del proceso de transición se presentaron entre 1970 y principios de 1980, pero en las últimas dos décadas se ha logrado muy poco progreso en este tema. Los métodos de transición propuestos se basan en la práctica con los controladores y la experiencia de los ingenieros; es decir, han primado los métodos empíricos. La mayoría de los estudios realizados hasta la fecha en el tema de transición entre planes de semaforización se han centrado en la comparación de los diferentes métodos existentes de transición utilizando diferentes escenarios reales, con el fin de evaluar su impacto potencial y las medidas de rendimiento en el funcionamiento de las señales de tráfico y la congestión del tráfico.

Muy pocos estudios han abordado la fase de transición mediante el uso de modelos matemáticos (Lee & Williams, 2012; Lieberman & Wicks, 1974; Selekwa, Mussa, & Chiteshe, 2003), por lo que es importante desarrollar nuevos modelos matemáticos en los que se pueda incorporar las reciente técnicas de modelado y optimización.

En esta investigación se presentará un alternativo y nuevo modelo matemático con el fin de mejorar la ejecución de la coordinación entre los semáforos de las intersecciones durante la fase de transición utilizando el modo de operación de tiempo u hora del día (TOD).

Este modelo será orientada a describir la transición en términos de los parámetros de coordinación: desfaseamiento (*offset*), duración del ciclo, y repartos (*split*) de las intersecciones de una arteria o corredor con el fin de minimizar el coste social durante la fase de transición expresado en función de la valoración económica de las demoras, el costo de consumo de combustible y las emisiones de gases al aire.

1.2. Motivación y planteamiento del problema

El diseño y la aplicación de buenas estrategias para mejorar la eficiencia del sistema de transporte pueden dar lugar a una reducción potencial en el consumo de combustible, las emisiones de gases de efecto invernadero y la demora o retraso. Estas estrategias incluyen las mejoras en los tiempos de los semáforos y los tiempos reales de viaje y sistemas de gestión de incidentes más eficaces y otros sistemas de aplicación.



Mejoras en los tiempos de reparto de los semáforos puede resultar en beneficios potenciales como la reducción en las demoras, consumo de combustible y las emisiones de gases. Un estudio de la situación de los semáforos en EE.UU indicó que más del 75% de las 300 000 señales de tráfico actualmente en uso podrían mejorarse fácilmente por medio de ajustes en los planes de semaforización logrando mejores características en el flujo vehicular (Chin, Franzese, Greene, Hwang, & Gibson, 2004).

Según la base de datos para la gestión de carreteras de la FHWA, mejoras básicas en los semáforos pueden lograr una reducción de 15 a 20% en la demora, mientras que las mejoras avanzadas, pueden reducir las demoras en hasta un 40% (Chin *et al.*, 2004).

Una de las estrategias más importantes usadas para mejorar las señales y el flujo de tráfico en las calles arteriales es la coordinación entre intersecciones.

La Coordinación es definida por el Manual de la señales de tráfico como la capacidad de sincronizar intersecciones para mejorar el funcionamiento de uno o más movimientos direccionales en un sistema ("B. National Research Council. Transportation Research.," 2010), y es una manera eficaz para mejorar la congestión del tráfico a lo largo de una carretera o red urbana. En un sistema coordinado un grupo de vehículos, conocido como pelotón, viajan juntos a través de una serie de intersecciones señalizadas, permitiendo un movimiento continuo, minimizando el número de paradas, el consumo de combustible y las demoras.

Un eficiente control de la coordinación requiere del diseño de planes óptimos en los repartos de los tiempos semafóricos ajustándolos de acuerdo a los patrones de tráfico. Esta es una tarea muy compleja que implica un modelado matemático y complicados procesos computacionales. Sin embargo, durante las últimas décadas, grandes esfuerzos se han realizado en el desarrollo y evaluación de los planes de semaforización de intersecciones señalizadas, mejorando la movilidad y la seguridad en las redes urbanas.

Los problemas de la movilidad durante la coordinación se producen debido a la fluctuación temporal y espacial de flujo de tráfico. Por ejemplo, durante los periodos de alto tráfico (horas pico), la demanda de tráfico suele exceder la capacidad y la congestión es inevitable. En este caso, los sistemas semafóricos deben ser diseñados



para aliviar la congestión del tráfico en las redes urbanas. En general, durante un día normal hay muchos cambios en los patrones de tráfico en las intersecciones de la red vial urbana; por lo tanto, es necesario cambiar el plan de tiempos de la señal de acuerdo con cada patrón de tráfico.

La mayoría de los sistemas de señales de tráfico son operados en un modo de hora o tiempo del día (TOD); es decir, el plan de tiempos de la señal se cambia según la hora del día (hora valle y hora pico AM y hora pico y hora valle PM) y no en función de los patrones de tráfico. En el modo de TOD el plan de tiempos de la señal son predefinidos basado en los datos históricos de la demanda de tráfico promedio correspondiente a cada periodo del día. De esta manera, cada momento del día tiene su propio plan de tiempos que debe aplicarse.

La figura 1 muestra un ejemplo de los períodos de tiempo en los que se utilizan diferentes planes de frecuencia de la señal TOD.

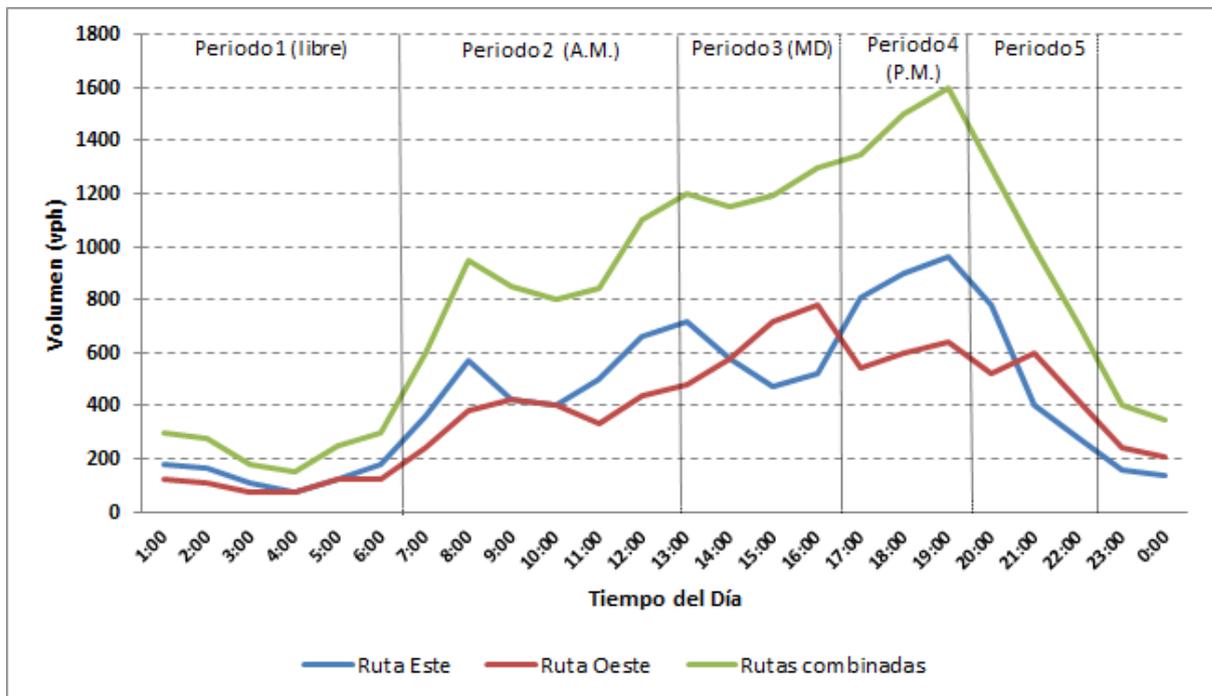


Figura 1. Programación tiempos de semáforos según horas del día

Cuando un período del día termina en TOD (ver Figura 1), es necesario terminar el plan actual programado para ese período con el fin de permitir la implementación de un nuevo plan de tiempos para la señal. Sin embargo, este cambio no puede ser inmediato ya que las diferentes intersecciones se encuentran en diferentes etapas del ciclo de



reparto. Por consiguiente, el cambio de un plan de tiempo a otro requiere una fase de transición. La transición es un período o modo de operación en el que los tiempos de la señal se modifican para lograr una coordinación (Shelby *et al.*, 2006).

Durante la fase de transición, a fin de ajustar los tiempos del semáforo desde un plan a otro, deben realizarse varios cambios en los parámetros ya sea cambios de desfaseamiento (*offset*), en los tiempos verde de las fases (*split*), en la duración del ciclo. El ajuste de un plan de tiempo puede tener un impacto negativo sobre el nivel de servicio ya que parámetros de operación no óptimos generan interrupción en la progresión del flujo. En efecto, el potencial de interrupción de la progresión vehicular entre los semáforos podría resultar en efectos que perduran en el tiempo tales como incrementos en el tiempo de viaje, la demora, la velocidad y las paradas, lo que minimiza los beneficios que el nuevo plan podría lograr.

Diferentes métodos de transición son utilizados por los controladores de tráfico para la transición de un plan de tiempo a otro nuevo plan. Los métodos más ampliamente utilizados son *inmediato*, *dos ciclos*, *tres ciclos*, *dwell*, *add*, *subtract* y *shorway*. Cada uno de estos métodos funciona mediante el alargamiento o acortamiento de la duración del ciclo del semáforo para lograr el nuevo desfaseamiento (*offset*) en el menor tiempo posible. Estos métodos o estrategias utilizan diferentes procedimientos o algoritmos que llevan a diferentes longitudes de cambio en el tiempo para completar la transición. Como resultado de estas diferentes longitudes de cambio, cada estrategia tiene el potencial de afectar el flujo de tráfico basado en el tiempo necesario para completar la transición (Obenberger & Collura, 2007). Cuando la transición es rápida (breve período de transición) la progresión vehicular entre las señales de tráfico se interrumpe abruptamente, lo que puede causar efectos negativos que perduren en el tiempo. Por otro lado, en una transición lenta (período de transición grande), los efectos sobre la progresión son menores, pero los beneficios que pueden otorgar el nuevo plan se obtienen tardíamente, causando aumentos en los tiempos de viaje, demoras, velocidad y número de paradas.

Optimizar la fase de transición o el cambio entre los planes de tiempo de la señal tiene un alto impacto en los conductores, pasajeros y el medio ambiente. Los conductores y



pasajeros se beneficiarán de la reducción al mínimo del tiempo de viaje, paradas y retrasos. Los efectos positivos sobre el medio ambiente darán lugar a una reducción de las emisiones contaminantes y el consumo de combustible.

A pesar de la importancia de una buena transición entre planes de semaforización, se han realizado muy pocos estudios al respecto. Estudios previos sobre la optimización de los procesos de transición se realizaron entre los años 1970 y principios de 1980. En los últimos años se ha logrado muy poco progreso en este tema. Un número limitado de proyectos de investigación llevados a cabo hasta la fecha sobre transición se ha centrado en la evaluación de las medidas de impacto y el rendimiento cuando se utilizan diferentes estrategias de transición en diferentes condiciones de tráfico.

Los métodos de transición propuestos son procedimientos empíricos que no hacen provecho de las actuales técnicas de modelado matemático y de optimización.

Durante 1970-1981, la mayoría de los artículos hacen referencias a métodos aplicados y sólo un método matemático es propuesto (Lieberman & Wicks, 1974), donde un algoritmo (RAST) fue diseñado para reducir al mínimo la duración del período de transición en los nodos críticos de una red urbana.

En las últimas dos décadas, la misma tendencia se mantuvo. Sin embargo, se hicieron más intentos para diseñar nuevos métodos matemáticos: Abbas, Bullock, Head, y Trb (2001) presentan un algoritmo para la transición del *offset* de una señal de tráfico basado en un enfoque de optimización integrada; Selekwa *et al.* (2003), propusieron una metodología para optimizar el flujo de tráfico basado en la optimización de un modelo dinámico cuadrático, mientras que Lee y Williams (2012) presentan un modelo matemático no lineal que permite reducir al mínimo la demora o retraso.

En general, una brecha de investigación notoria es identificada debido a la falta de estudios y nuevas propuestas de métodos matemáticos y de optimización para la fase de transición.

Esta investigación presenta un alternativo y nuevo modelo matemático que mejorará el desempeño de la fase de transición en las intersecciones coordinadas utilizando un



modo de operación de hora o el tiempo del día (TOD). El diseño de este modelo matemático debe responder a las siguientes preguntas:

1. ¿Qué valores de los parámetros de coordinación se debe utilizar durante el período de transición?
2. ¿Cuál es el número óptimo de ciclos necesarios para lograr la transición?

La respuesta a estas preguntas estará orientada a minimizar el costo social durante la fase de transición, el cual se expresa en función del costo de la demora, el costo del consumo de combustible y el costo de las emisiones de gases al aire.

1.3. Objetivos de investigación, premisa central e hipótesis

El propósito de esta investigación es mejorar la ejecución e implementación de la transición entre los planes de tiempos de los semáforos en las intersecciones coordinadas utilizando un modo de operación de tiempo-de-día (TOD). Para lograr este objetivo, se desarrollara un nuevo y novedoso modelo matemático, el cual pretende eliminar los efectos negativos de los cambios de un plan de tiempo de semaforización a otro. Técnicas de modelado matemático y suavización se utilizan para reducir la interrupción en la progresión del tráfico y también se recurren a metodologías metaheurísticas de optimización para determinar el tiempo de transición requerido y los parámetros de operación. Se evaluará el modelo basado en su capacidad para reducir al mínimo el tiempo de viaje, paradas, demoras, las emisiones contaminantes y el consumo de combustible durante el período de transición.

La premisa central de esta investigación se basa en el impacto social del modelo propuesto desde el punto de vista del usuario y el medio ambiente.

A continuación se describen los principales objetivos de este estudio de investigación:

1. Desarrollar un modelo matemático de transición en términos de los parámetros de coordinación (*offset*, *split* y la duración del ciclo) de todas las intersecciones de una arteria o corredor con el fin de minimizar el costo social durante la fase de transición. Esta función esta expresada en términos del costo de demora, costo de consumo de combustible y el costo de las emisiones a la atmósfera.



2. Optimizar el modelo matemático de transición mediante el uso de técnicas meta heurísticas de optimización para evaluar el desempeño de la transición entre planes de tiempos de la señal, en las intersecciones coordinadas, en un modo operación de hora o tiempo-del-día (TOD).
3. Evaluar la eficacia del nuevo modelo para obtener mejores medidas de rendimiento (demora, tiempo de viaje, las paradas, la contaminación del aire y el consumo de combustible).

Esta investigación fue limitada en su alcance a desarrollar y evaluar sólo los temas que implican la transición entre los planes de semaforización y medir la efectividad del modelo propuesto a niveles de volumen de tráfico y condiciones del sistema (arteria) constante.

De acuerdo con la premisa central y objetivos previamente desarrollados, la hipótesis de esta investigación se puede expresar de la siguiente manera:

1. Los usuarios se beneficiarán de este nuevo modelo matemático que reduce al mínimo el costo social asociado a la transición entre las intersecciones coordinadas.
2. El medio ambiente se beneficiarán de la aplicación de este nuevo modelo matemático que reduce al mínimo el consumo de combustible y las emisiones de gases contaminantes al aire asociados a la fase de transición en las intersecciones coordinadas.

1.4. Estructura de la tesis

Los resultados del estudio de investigación están contenidos en siete (7) capítulos organizados de la siguiente manera:

Capítulo 1 - Introducción - Este capítulo comprende los antecedentes de la investigación, así como, la motivación, el planteamiento del problema, los objetivos de la investigación, la premisa central, la hipótesis y las tareas de investigación.

Capítulo 2 – Análisis de la problemática de la transición - Este capítulo comprende una revisión exhaustiva de la literatura sobre la transición entre los diferentes planes de



tiempo de los semáforos, para así, resaltar las brechas existentes en la investigación con el fin de ofrecer un punto de partida para abordar la problemática.

Capítulo 3 – Estudio de los modelos existentes para la demora, consumo de combustible y emisiones de gases a la atmósfera-En este capítulo se presentara una recopilación de los modelos más relevantes encontrados en la literatura para abordar matemáticamente la demora, el consumo de combustible y las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera.

Capítulo 4 –Diseño de la función social de costo-En este capítulo se presentara el diseño de una función de costo social expresado en términos de la demora, el consumo de combustible y las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera.

Capítulo 5 –Diseño y optimización de un Modelo Matemático para la Transición entre planes de semaforización - Este capítulo presenta en detalle el modelo matemático desarrollado para la transición y la optimización para encontrar los parámetros óptimos del mismo basada en la técnica de optimización de colonia de hormigas. En este capítulo se realizaran las pruebas y análisis necesarios para ajustar el modelo y comparar la ejecución del mismo.

Capítulo 6 – Caso de Estudio - En este capítulo se presenta el diseño de un plan de transición para un caso real en una arteria semaforizada de la ciudad de Santander y el análisis de los resultados obtenidos con el modelo propuesto; comparaciones en diferentes escenarios serán desarrolladas.

Capítulo 7 – Conclusiones y futuras líneas - En este capítulo se presentaran las conclusiones, y futuras líneas de investigación, producto de la investigación y desarrollos realizados.

1.5. Aportaciones

Esta investigación orientara todos los esfuerzos para desarrollar un modelo matemático integral que permita mejorar el desempeño de la transición entre los planes de semaforización en las intersecciones coordinadas, usando un enfoque multi objetivo, que comprenda la minimización de una función de costos sociales



Las siguientes actividades serán desarrolladas para cumplir con los objetivos planteados y se proponen avances en los siguientes aspectos:

- a) Un análisis exhaustivo de la problemática de la transición, incluyendo los diferentes métodos de transición entre planes de semaforización y los modos de operación actuales (tanto los modelos teóricos, como los prácticos o empíricos), y todos los estudios pertinentes que apoyen este estudio y que permitan identificar brechas de investigación.
- b) Desarrollar una función matemática que minimice el costo social en términos de tres componentes que correspondan a la demora, al consumo de combustible y a las emisiones de gases contaminantes al aire.
- c) Diseñar un método heurístico para determinar diferentes planes de transición en función del número de pasos para ajustar los planes de semaforización.
- d) Evaluar el impacto del número de pasos necesarios para lograr la señal de semaforización en la función del costo social a través de un estudio de caso.
- e) Diseñar un modelo matemático donde la transición será expresada como un proceso dinámico, en términos de los parámetros de coordinación, con el fin de minimizar la función de costo social propuesta.
- f) Desarrollar de un algoritmo de optimización de colonia de hormigas, como método de optimización para encontrar los parámetros óptimos de transición, a partir del modelo matemático diseñado.
- g) Desarrollar y codificar el algoritmo desarrollado utilizando los datos disponibles para de esta forma ejecutar el método propuesto.
- h) Construir escenarios de simulación en AIMSUN a partir de los datos disponibles que permitan establecer las comparaciones entre el modelo propuesto y las aplicaciones existentes. La demora, la contaminación del aire y el consumo de combustible se utilizaran como medidas de desempeño del modelo propuesto.



- i) Evaluar la eficacia del modelo propuesto, una vez ajustado, mediante su aplicación en un caso real de una arteria semaforizada en la ciudad de Santander.
- j) Es importante mencionar además, que producto de esta tesis, se ha logrado trabajar en varios artículos para su publicación en revistas internacionales, lo cual cuantifica el aporte real de los estudios desarrollados en esta investigación. Los productos mencionados son:
 - i. Transition between signal timing plans: a methodological and analytical overview. *Transport Reviews*, 34(3), pp. 356-378. Doi: 10.1080/01441647.2014.905648.
 - ii. Impact of transition between signal timing plans in social cost based in delay, fuel consumption and air emissions," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 41C pp. 445-456. Doi: 10.1016/j.trd.2015.10.018.
 - iii. Design of an optimal model for traffic signal plan transition based on social cost function. *Journal of Advanced Transportation*. En revisión Noviembre 2015.



Capítulo 2
**ANÁLISIS DE LA PROBLEMÁTICA DE LA TRANSICION
ENTRE PLANES DE SEMAFORIZACIÓN**





2. ANÁLISIS DE LA PROBLEMÁTICA DE LA TRANSICIÓN ENTRE LOS PLANES DE TIEMPO DE LOS SEMAFOROS

La fase de transición se define como el proceso de cambiar de un plan de semaforización a otro; este proceso puede incluir cambios en el *offset* o desfase, reparto de tiempos de verde (*split*) o la duración del ciclo hasta que se alcanza nuevamente la coordinación con el nuevo plan. Como se ha señalado en la literatura, la transición o cambio entre los planes de tiempo de los semáforos pueden conducir a graves interrupciones en el flujo de tráfico provocando efectos potencialmente duraderos en el tiempo.

El objetivo de este capítulo es revisar exhaustivamente, clasificar y analizar la literatura existente sobre la transición entre los diferentes planes de tiempo de los semáforos y resaltar las brechas existentes en la investigación con el fin de ofrecer un punto de partida para abordar la problemática y aportar una alternativa de solución a la misma.

2.1. Introducción

Durante décadas, la creciente demanda de transporte y de carreteras de tráfico en las ciudades ha dado lugar a la congestión, retrasos, colas, aumento del tiempo de viaje, accidentes y problemas ambientales. Una investigación reciente demostró que la



congestión causó que los estadounidenses en zonas urbanas viajaron 4.8 billones de horas más, y compraron un extra de 1,9 billones de galones de combustible (Schrank & T. J. Lomax, 2011).

Ajustar la progresión en los corredores se ha convertido en una de las principales herramienta para mejorar los problemas del tráfico y la movilidad en las ciudades. La coordinación de los semáforos y optimización de planes de semaforización y las fases de transición se utilizan a menudo para lograr esta meta.

Generalmente existen dos modos de operación en un sistema de señal coordinada: Hora del día (TOD por sus siglas en ingles), que establece el plan de coordinación de eventos de acuerdo a un tiempo determinado del día y Selección de Patrones de Tráfico (TRP por sus siglas en ingles), que recibe los datos de los detectores de tráfico y elige un plan de tiempos adecuado que coincida con las condiciones de tráfico existentes. Además, hay un modo de operación con preferencia a la emergencia y a las vías férreas donde la operación normal es anticipar los tiempos de verde del semáforo para ayudar a formas de transporte con un cierto grado de prioridad.

Diferentes corredores pueden requerir diferentes modos de operación basados en sus necesidades y patrones de tráfico relativos (Balke *et al.*, 1998). Para cada uno de estos modos de operación, las programaciones de los semáforos deben pasar a través de una fase de transición cada vez que se modifica un plan de semaforización. La fase de transición se define generalmente como el proceso de cambiar de un plan de tiempos de semáforos a otro y podría incluir cambios en el *offset* o desfase, tiempos de verde o duración del ciclo, o todas ellas a la vez (Cohen, Head, & Shelby, 2007), hasta que se logre una vez más la coordinación en el nuevo plan.

Como ha sido señalado por varios autores (Lee & Williams, 2012; Shelby *et al.*, 2006; Yun, Best, & Park, 2008), las fases de transición pueden dar lugar a graves interrupciones en el flujo de tráfico cuando los ciclos se alargan o acortan, y podrían resultar efectos potencialmente duraderos en el tiempo. Basu (1981) reportó que los efectos de las transiciones entre planes de semaforización son significativamente más perjudiciales que las que pueden haber sido reconocidas y que bajo condiciones de demanda cambiante, se justifica un cambio de plan en los tiempos de los semáforos



sólo si los beneficios que proporciona el nuevo plan de frecuencia de la señal superan los efectos perjudiciales de la transición entre planes. Por otra parte, también se demostró que para condiciones de demanda creciente, los efectos perjudiciales de la transición aumentan en magnitud.

McShane y Roess (2011), declararon que durante la fase de transición, los semáforos están funcionando con parámetros que difieren de los óptimos, lo cual podría originar efectos no deseados: tiempos de rojos que son muy cortos, que los peatones queden expuestos frente al tráfico en movimiento, tiempos de rojos que son tan extendidos que colas excesivas se acumulan en un acceso, en tanto que en otros hay pocos vehículos. A su vez, autores como Shelby et al.(2006), Cohen et al.(2007) y Lee y Williams (2012) también han documentado una disminución en el nivel de servicio cuando el ajuste entre los planes de tiempos del semáforo causa el retraso e interrupción en la progresión de pelotón o grupo de vehículos.

Bajo las condiciones actuales de tráfico, se requiere que las señales coordinadas operen de manera óptima incluso durante las fases de transición entre planes de semaforización (Selekwa *et al.*, 2003). Un buen ajuste en los tiempo de semaforización, debido a los cambio en las condiciones del flujo de tráfico, puede tener un impacto positivo significativo en la reducción de la congestión, retrasos, tiempo de viaje, paradas e incluso en las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera. Por lo tanto, el propósito de este capítulo es revisar exhaustivamente, clasificar y analizar la información que se encuentra en la literatura respecto a la transición entre los diferentes planes de semaforización, para lo cual se diseñó un método de clasificación. El objetivo final es ofrecer un punto de partida para abordar soluciones al problema de la transición y simplificar la tarea de responder a la pregunta en torno a cual estrategia de transición debe ser implementada bajo un conjunto de condiciones dadas para reducir las interrupciones del flujo de tráfico y evitar efectos potencialmente duraderos.

Este capítulo está estructurado de la siguiente manera: en la Sección 2.2 se presenta la metodología para la clasificación utilizada; en la Sección 2.3 se establece el marco de clasificación; en la sección 2.4 se presenta la revisión literaria; Sección 2.5 incluye los



resultados y discusión del estudio; en la sección 2.6 se presenta un estudio de validación por parte de expertos; en la sección 2.7 se exponen conclusiones parciales que a la luz del análisis realizado permitan abordar eficientemente el tema de la transición en los capítulos siguientes.

2.2. Metodología para la clasificación y análisis

Para el análisis de la transición y definir potenciales líneas de acción para la problemática planteada, se propone una metodología integral de análisis que consta de los siguientes pasos:

Paso 1: Se llevó a cabo una revisión literaria sobre los métodos de transición basada en la información obtenida de bases de datos.

Paso 2: Desarrollo de un marco de clasificación (Sección 2.3)

Paso 3: El marco de clasificación se utiliza para organizar, resumir y discutir lo que se conoce acerca de la de la transición (Sección 2.4).

Paso 4: Análisis de la problemática de la transición (Secciones 2.5).

Paso 5: Encuesta de validación por parte de expertos (Sección 2.6).

Paso 6: Conclusiones parciales (Secciones 2.7).

Para este estudio se analiza y evalúa la información no sólo de revistas científicas sino también de tesis de maestrías y doctorales, manuales e informes que están disponibles públicamente.

2.3. Marco de clasificación

El proceso de clasificación se basa en las siguientes seis preguntas, producto de la revisión literaria previa:

(A) ¿Cuál es el enfoque de la transición?

(B) ¿Cuál es el propósito de la investigación?

(C) ¿Qué modo de operación se utiliza?

(D) ¿Qué herramienta o programa de simulación se utiliza?



(E) ¿Qué método de transición se utiliza?

(F) ¿Que controladores se utilizan?

Cada pregunta tiene varias respuestas las cuales son usadas para dividir en categorías los artículos revisados. Las categorías resultantes son las siguientes:

(A) Enfoque de transición: Esta clasificación determina el enfoque utilizado para abordar la fase de transición.

- I. *Métodos aplicados o empíricos:* Estudios donde la transición es obtenida por un cambio repentino o gradual de los parámetros del plan y son generalmente utilizados por los fabricantes del *software* y controladores de tráfico.
- II. *Métodos matemáticos:* Los estudios que se basan en la optimización de las medidas operativas de eficacia durante la transición mediante modelos matemáticos. Esta categoría puede dividirse de acuerdo con el objetivo de optimización:
 - a) *Demora:* Modelos diseñados para determinar los parámetros óptimos para minimizar los retrasos o demora.
 - b) *Tiempo de transición:* Modelos que tienen por objetivo reducir al mínimo el tiempo de transición.
 - c) *Desfase ó offset:* Modelos que tienen por objetivo optimizar las mediciones de desempeño relacionados con el desfase u *offset*.
 - d) *Parámetros óptimos de desviación:* Modelos que tienen por objetivo minimizar la desviación de los parámetros óptimos de los valores óptimos durante el periodo de transición.

(B) Propósito de la investigación: Los artículos son clasificados de acuerdo a la intención original del autor.

- I. *Estudios comparativos:* La investigación presenta una comparación de los métodos de transición.
- II. *Estudios de diseño:* La investigación presenta nuevas propuestas en relación con los métodos de transición o nuevos procedimientos para estimar variables de transición.



III. *Estudios de impacto*: Se evalúa el impacto de los métodos de transición sobre el rendimiento del tráfico.

IV. *Estudio/Revisión*

(C) Modos de operación: Esta categoría considera los modos de operación evaluados.

I. *Transición en Hora-del-Día (TOD)*: Es una técnica de conexión que utiliza datos históricos para cambiar el plan de semaforización basado en una hora del día. El plan de tiempos del semáforo no cambia en respuesta a las condiciones cambiantes del tráfico.

II. *Selección en respuesta a los patrones de tráfico (TRSP por sus siglas en ingles/Sistema de control de tráfico adaptativo (ATCS por sus siglas en inglés)*: Es una técnica en línea que utiliza los datos de tráfico en tiempo real recolectados por detectores para responder a las condiciones cambiantes del tráfico, ya sea mediante la implementación de planes de tiempo predeterminados (TRSP) o mediante el establecimiento de los parámetros de operación a través de modelos de flujo de tráfico (ATCS).

III. *Prioridad*: Es una técnica que permite la operación normal de los semáforos y consiste en anticiparse para dar preferencia a los vehículos de emergencia, cruces de ferrocarril o el transporte público.

(D) Herramientas o programas de simulación usados: Esta clasificación incluye las herramientas de simulación utilizadas.

I. *NETSIM*: Paquete de *software* de simulación de tráfico desarrollado por TETCOS.

II. *TRANSYT*: Paquete de *software* de simulación de tráfico desarrollado en UK por el Laboratorio de Investigación de Transporte.

III. *CORSIM*: Paquete de *software* de simulación de tráfico microscópica desarrollado por Mc Trans Center.

IV. *VISSIM*: *Software* de simulación microscópica de flujo de tráfico multimodal desarrollado por PTV Planung Transport Verkehr AG.

V. *ROSIM*: Paquete de simulación estocástica desarrollado en Inglaterra por el Laboratorio de Investigación de carretera.



(E) Método de transición usado: Estas categorías cubren los métodos de transición encontrados en la literatura.

- I. *Método de transición inmediata:* Estrategia de transición del tiempo verde sobre la calle principal hasta que se alcanza el nuevo punto de sincronización. Este método completa la transición a la nueva configuración utilizando un ciclo para lograr la sincronización.
- II. *Método de transición de dos ciclos:* La estrategia de transición es similar a la del método inmediato pero usando dos ciclos para lograr la nueva configuración.
- III. *Método de transición de tres ciclos:* La estrategia de transición es similar a la del método inmediato pero usando tres ciclos para lograr la nueva configuración.
- IV. *Dwell (Sostenido):* Este método sostiene la fase coordinada en verde hasta que se sincroniza con el calendario en el nuevo plan de semaforización, todo dentro de un ciclo.
- V. *Max dwell (Máxima espera):* Esta es una variación del algoritmo *dwell* o sostenido, con un tiempo máximo predeterminado en la fase de permanencia para alcanzar la sincronización; si se obtiene el tiempo máximo antes de la sincronización, este continúa a través de las fases restantes y el proceso se repite hasta que se alcanza la sincronización.
- VI. *Add/Add Only/Longway/Long:* Este método corrige el desfase por el alargamiento del ciclo (agregando tiempo verde o rojo) para que todas las duraciones de fase aumenten proporcionalmente en su separación hasta que el desfase deseado se logre. El tiempo máximo agregado a cada ciclo está limitado generalmente por un porcentaje de la duración del ciclo.
- VII. *Subtract/Short:* Se corrige el desfase por la disminución de la duración del ciclo (fases de acortamiento) en un porcentaje especificado. Generalmente todas las fases se acortan.
- VIII. *Shortway/Smooth/Bestway/Minimax/Short-long/Shortroute/shortest:* Se utilizan algoritmos de sumar o restar, dependiendo de cuál logre la



sincronización de forma más rápida. Las condiciones y variaciones de este algoritmo dependen del proveedor de *software*.

- IX. *Métodos matemáticos o teóricos*: Métodos basados en la optimización de las medidas operativas de eficacia utilizando modelos matemáticos.
- X. *Otros*: Métodos que aún no han sido evaluados adecuadamente en la literatura.

(F) Controlador: Esta categoría incluye todos los controladores utilizados en los artículos revisados.

- I. Eagle (EPAC300)
- II. Econolite (ASC/3, 2070 ATC, ASC2S, ASC/3-2070)
- III. Siemens (Nextphase)
- IV. Naztec (Model 980)
- V. Mc Cain (170E)

2.4. Los Métodos de transición

En esta sección la información se ordena de acuerdo con el método de clasificación propuesto. Los sistemas se dividen de acuerdo a la categoría (A) referente a los métodos aplicados y métodos matemáticos.

2.4.1. Enfoque en el estudio de la transición

La literatura relacionada con la transición entre los planes de tiempo de los semáforos, se hizo prominente durante 1970 cuando los sistemas de señales computarizadas tomaron el lugar de los controladores electromecánicos que anteriormente sólo habían incluido el método *Dwell* como una forma práctica de realizar la transición de planes del semáforo (Shelby, Bullock, & Gettman, 2006). Desde este punto, generalmente se desarrollaron con más frecuencia cambios en los planes semaforización y más métodos de transición como informes técnicos para desarrolladores. El Sistema de Control de Tráfico Urbano (UTCs) se utilizó en muchos de estos primeros experimentos (Cohen *et al.*, 2007). Para manejar la transición se identificó en la literatura que dos grandes tendencias, a través de métodos aplicados o empíricos o mediante métodos matemáticos.



2.4.1.1. Métodos aplicados o empíricos

Para revisar y presentar los hallazgos significativos de cada estudio, los artículos que pertenecen a esta categoría se clasifican de acuerdo al tipo de simulación de control de tráfico. Hay tres métodos para modelar la simulación de control de tráfico: la emulación en bucle, *software* en bucle o *hardware*-en bucle.

Un resumen que contiene información relevante de los artículos que pertenecen a cada categoría se presenta en las tablas 1, 2 y 3. La primera columna contiene el nombre del autor y año de publicación; la segunda columna contiene una breve descripción de las condiciones y objetivo principal del estudio; y, por último, la tercera columna contiene una breve resume sobre los hallazgos relevantes de cada estudio.

2.4.1.1.1. Simulación basada en emulación en bucle (EILS por sus siglas en inglés)

Este método de simulación de control de tráfico reproduce un controlador de señal dentro del programa de micro-simulación; es decir, el controlador de señal funciona como una característica de *software* de simulación. Como los emuladores no tienen una contraparte utilizado en el campo, la principal desventaja de EILS es que no proporciona la sofisticación y la variedad de operaciones de control de un controlador de campo. Entre las ventajas de este método, se puede hacer mención de los ajustes con menor complejidad y los costes de instalación y una mayor velocidad de simulación (Zlatkovic, 2012). La Tabla 1 enumera los artículos EILS observados en la literatura.

| Autores | Contexto | Resultados relevantes |
|----------------------|---|--|
| Messer et al. (1976) | Un análisis de simulación fue realizado usando los métodos de transición <i>Add</i> y <i>Subtract</i> . Para lograr la transición, en escenarios de uno, dos y cuatro ciclos fueron simulados utilizando 0.4, 0.6 y 0.8 proporciones de saturación. | Suavizar las correcciones o porcentaje de cambio a mayor número de ciclos reduce el retraso por vehículo. Las correcciones deben limitarse entre 30% y 70% de la longitud del ciclo en incrementos de no más de 25% y 10% por ciclo. |



| Autores | Contexto | Resultados relevantes |
|---------------------|--|---|
| Ross (1977) | Se evalúa el efecto de seis algoritmos de transición en la velocidad media y las paradas por vehículo en tres condiciones de volumen de tráfico. Un algoritmo sensible llamado FRONT (una versión temprana de PASSER) es usado como el programa de optimización de la señal estándar operando como un subprograma del programa del controlador UTCS-1. | Los algoritmos para los cambios graduales y grandes de los tiempos de verde para la calle principal tuvieron mejor desempeño, y no se observaron diferencias esenciales entre los métodos <i>Shortway Dwell</i> en relación con las dos medidas de desempeño evaluadas. |
| Bretherton (1979) | Una comparación entre los distintos métodos de transición cuando se cambia desde el plan de tiempos del semáforo para el período de horas fuera de pico al periodo de horas pico y viceversa en una red simulada en el Reino Unido. | El <i>Minimax</i> y el método modificado de transición abrupta dieron como resultado una mejora significativa sobre los otros métodos de transición, y no se observaron diferencias significativas entre los dos. |
| Basu (1981) | El algoritmo de transición <i>Shortway</i> se evaluó bajo varios niveles de volúmenes de tráfico (aumento y decremento) utilizando los modelos NETSIM y TRANSYT. | El porcentaje de demora causado por la transición en el total de la red aumenta con un incremento en la saturación de la misma. Con el aumento de la demanda, periodos de transición más largo, sujetos a varios ciclos, causan que los efectos de transición sean más perjudiciales. |
| Hunt et al. (1981) | Un sistema central que tiene el control segundo a segundo sobre los controladores de la señal y que actualiza los planes de tiempo de los semáforos continuamente (SCOOT) es descrito. El sistema está diseñado para cambiar el ciclo, <i>split</i> o tiempo de verde y el <i>offset</i> mediante pequeños incrementos en cada ciclo. | El sistema reduce los efectos perjudiciales de la transición mediante el ajuste de cada parámetro en no más de unos pocos segundos. |
| Balke et al. (1998) | Un programa de computadora (SIGTRAN) fue desarrollado para seleccionar nuevos planes de temporización en el modo sensible del tráfico o de respuesta a patrones. Los efectos del cambio en los planes de tiempo de los semáforos se evaluaron mediante la estimación de la demora como efecto de la interrupción | El programa produjo ahorros significativos en la demora de los períodos pico en mañana y tarde en comparación con la operación de las señales en un modo de tiempo de día (TOD). Moderado ahorro en la demora se generó en los periodos fuera de las horas pico. |



| Autores | Contexto | Resultados relevantes |
|------------------------------------|---|---|
| | provocada por la transición. | |
| Shelby, Bullock and Gettman (2006) | Se realizó una comparación de varios métodos de transición utilizando diferentes niveles de congestión para determinar en qué método la disrupción fue menos perjudicial debido a la demora del vehículo. El estudio utiliza las nuevas capacidades para la transición añadidas a CORSIM 5.2 basado en la funcionalidad actual para la transición en los controladores Eagle, Econolite, NextPhase y Naztec. | El método de transición Shortway resulto ser el más eficaz en general; sin embargo, bajo condiciones de congestión el método <i>Add</i> obtuvo mejores niveles de desempeño. El método <i>Dwell</i> de transición fue en general el más disruptivo. |
| Cohen, Head and Shelby (2007) | Un método llamado análisis del perfil transitoria se introdujo para predecir y comparar el rendimiento durante el período de transición de los algoritmos de transición más populares (<i>Dwell</i> , <i>Max Dwell</i> , <i>Shortway</i> , <i>Subtract</i>) utilizando CORSIM 6.0 (versión beta). | El método <i>Dwell</i> resulto ser inapropiado para las arterias principales y produjo una disrupción significativa. En un contexto completamente saturado, el método <i>Subtract</i> exhibió comportamientos más suaves y estables. |
| Lee and Williams (2012) | Se realizó un análisis con los algoritmos de transición incluidos en CORSIM tanto para los modos de control <i>pre-timed</i> (predeterminado) (inmediato, dos ciclos y tres ciclos) y <i>actuated</i> (accionado) (<i>Add</i> , <i>Dwell</i> , <i>Subtract</i> , <i>Shortway</i>). Los algoritmos se compararon para evaluar la demora bajo dos situaciones operativas, la transición en los periodos de alta y baja demanda específicamente. | Configuraciones provistas por el controlador resultaron ser factores importantes que afectaron la ejecución del plan de transición. Para la mayoría de los escenarios de simulación, el método <i>Shortway</i> obtuvo mejores resultados. Los métodos de transición inmediata y en tres ciclos obtuvieron buenos desempeños para los periodos de tiempo de alta demanda u horas pico, mientras que los algoritmos de transición <i>pre-timed</i> experimentaron notable incremento en las demoras para las calles secundarias en horas no pico. |

Tabla 1. Artículos desarrollados con simulación basada en emulación en bucle

2.4.1.1.2. Simulación basada en *software* en bucle (SILS por sus siglas en inglés)

La simulación usando *software* en bucle reproduce el controlador de la señal desde el *software* de un controlador real haciendo uso del código base del mismo. En el equipo, el modelo de simulación microscópica y la emulación de *software* del controlador



están vinculados a través de una interfaz que intercambia información. Bajo SILS, varios controladores virtuales pueden ser probados sin el costo y la complejidad asociados con los controladores de campo de pruebas. Además, el SILS suele necesitar menos tiempo y se ejecuta en un modo más rápido que en tiempo real. No obstante, SILS no pueden tener toda la funcionalidad y el realismo de un controlador real de tráfico (Zlatkovic, 2012). La Tabla 2 enumera los artículos SILS encontrados en la literatura.

| Autores | Contexto | Resultados relevantes |
|-------------------------------|--|--|
| Obenberger and Collura (2001) | Se plantea una evaluación del estado de la práctica para diferentes estrategias de transición utilizados para los modos de control de prioritario o preferentes. Se utilizó CORSIM como herramienta de simulación en combinación con el software de controlador NextPhase. | Para aumentos de la demanda de tráfico del 40%, el algoritmo Short obtuvo las peores medidas de desempeño, y no hubo diferencias significativas entre los métodos <i>Long</i> , <i>Hold</i> y <i>Best way</i> . Para incrementos del 20%, <i>Bestway</i> superó a los otros algoritmos, mientras que los algoritmos <i>Short</i> y <i>Long</i> fueron los menos eficientes. |
| Obenberger and Collura (2007) | Una evaluación del desempeño de los métodos de transición <i>Bestway</i> , <i>Long</i> , <i>Short</i> y <i>Hold</i> bajo modo de control prioritario o preferente fue realizada. CORSIM 5.2 se utilizó como herramienta de simulación en combinación con el software de controlador NextPhase. | Para aumentos en los volúmenes de tráfico del 40%, las estrategias de transición más efectivas fueron los métodos <i>Bestway</i> , <i>Long</i> y <i>Hold</i> , y la estrategia menos efectiva fue desarrollada con el método <i>Short</i> . Sin embargo, <i>Bestway</i> realizó el mejor desempeño para un aumento del 20% en los volúmenes de tráfico, mientras que los métodos <i>Long</i> y <i>Short</i> mostraron el peor desempeño. |

Tabla 2. Artículos desarrollados con simulación basada en *software* en bucle

2.4.1.1.3. Simulación de *hardware*-en bucle (HILS)

Hardware en bucle vincula al modelo de micro simulación uno o más controladores reales de tráfico a través de un dispositivo de interfaz de controlador. HILS conserva toda la funcionalidad y el realismo de un sistema del mundo real y permite regular y evaluar las funciones que no puede ser emulado en *software*. Dado que el tráfico se controla en tiempo real utilizando un controlador de tráfico real, el usuario es capaz de evaluar todas las características del controlador sin tener un impacto en un sistema en el mundo real. Sin embargo, la aplicación de HILS puede ser más compleja y requiere mucho tiempo (sólo control en tiempo real) en comparación con otras simulaciones de control de tráfico. La Tabla 3 enumera los artículos HILS encontrados en la literatura.



| Autores | Contexto | Resultados relevantes |
|---------------------------------|---|---|
| Hamilton (2000) | Se evaluaron los métodos de transición <i>Shortway</i> y <i>Dwell</i> con el controlador Eagle EPAC300. Una intersección aislada fue estudiada con un 85% de saturación para la fase coordinada y diversos desfases u <i>offsets</i> de 10%, 30%, 50%, 70% y 90% del ciclo. | El método <i>Shortway</i> tuvo el mejor desempeño para los diferentes <i>offsets</i> con relación a la demora por vehículo. |
| Nelson and Bullock (2000) | El efecto de la presencia de vehículos de emergencia en las señales de tráfico se evaluó utilizando CORSIM y controladores Econolite. Los algoritmos <i>Dwell</i> , <i>Add</i> y <i>Smooth</i> fueron evaluados, y el número de ciclos durante el período de simulación varió de uno a tres ciclos. | Un solo cambio por la presencia de vehículo prioritario tuvo un efecto mínimo en el tiempo de viaje en general y la demora a través de la red, y el algoritmo de transición se desempeñó de la mejor manera para la mayoría de escenarios y rutas, tanto para arteria principal como para las calles laterales. Para múltiples vehículos de emergencia el efecto sobre los tiempos de transición fue más severo. |
| Sunkari et al. (2004) | Se evaluaron características avanzadas para controladores Eagle y Naztec (modos de <i>force off</i> , modos de coordinación, modos de corrección y modos de transición). Para el controlador Eagle, se analizaron cinco algoritmos de transición, y para el controlador Naztec, se probaron cuatro algoritmos de transición. | Para los controladores Eagle, se recomienda el uso de <i>Shortway</i> en lugar de <i>Dwell</i> , mientras que para los controladores Naztec, se recomienda el <i>Short</i> y <i>Long</i> para corrección del desfase u <i>offset</i> de hasta 17% por ciclo. |
| Park, Yun and Best (2008) | Este estudio tuvo como objetivo identificar los métodos de transición en controladores avanzados (por ejemplo, 2070 y ASC/3) controladores, que minimizan los efectos negativos durante el uso del modo de operación para vehículo de emergencia o preferentes y determinar el mejor método de transición para los cambios en los planes del modo de operación TOD. Se evaluaron tres controladores de tráfico (McCain 170E (<i>Shortway</i>), Econolite 2070 (<i>Smooth</i> , <i>Add</i> y <i>Dwell</i>) y la ASC/3-2.100 (<i>Smooth</i> , <i>Add Only</i> y <i>Dwell</i>)) vinculados a una red VISSIM. | Los resultados del estudio indicaron que los controladores avanzados (por ejemplo, 2070 y ASC/3) tienen ventajas sobre el controlador 170 para las estrategias de recuperación EVP. Los métodos de transición <i>Shortway/Smooth</i> superaron en general a otros métodos, mientras que <i>Dwell</i> no siempre recupero a la coordinación en el controlador 170. El controlador 170E superó los controladores 2.070 y ASC/3 en la mayoría de las medidas de desempeño para los dos escenarios de transición evaluados cuando se opera en el modo de operación TOD. |



| | | |
|----------------------------------|---|---|
| <p>Yun, Best and Park (2008)</p> | <p>Dos controladores de tráfico: 170E de McCain (<i>Shortway</i>) y de Econolite 2070 ATC (<i>Smooth, Add y Dwell</i>) vinculados a una red VISSIM fueron probados para identificar cuáles de sus métodos de transición minimizaba la interrupción en la operación de las señales de tráfico causado por el modo de operación para vehículo de emergencia o preferente (EVP).</p> | <p>Las medidas de desempeño se vieron afectadas significativamente por los métodos de transición para EVP. Los métodos de transición Minimax (<i>Shortway</i> en el 170E y <i>Smooth</i> en el 2070 ATC) en general superaron los otros métodos de transición. Además, el uso de la característica de fase de salida en el controlador 2070 ATC proporciono ventajas sobre el controlador 170E.</p> |
| <p>Yun, Best and Park (2008)</p> | <p>Una evaluación del desempeño de los controladores de tráfico durante la transición en el modo de operación TOD para identificar el método que mejor minimiza la interrupción causada por el cambio de planes en los tiempos de los semáforos. Tres controladores de tráfico (McCain 170E, Econolite 2070 ATC y la ASC/3-2.100) se evaluaron vinculados a una red VISSIM.</p> | <p>El desempeño durante la transición varío dependiendo del método de transición utilizado. El controlador Econolite 2070 ATC superó a los otros dos controladores, y los métodos de transición de la familia <i>Minimax (Shortway, Smooth)</i> generalmente superó a los otros algoritmos de transición. Además, el inicio rápido de la operación de transición disponible en el controlador ASC/3-2100 proporciono importantes beneficios sobre los obtenidos en el controlador Econolite 2070 ATC.</p> |

Tabla 3. Artículos desarrollados con simulación basada en *hardware* en bucle

2.4.1.2. Métodos matemáticos

Esta categoría agrupa los estudios encontrados en la literatura que abordan la transición desde el punto de vista matemático mediante la optimización de una medida operativa de la eficacia del mismo. A continuación un resumen de los estudios más relevantes.

Lieberman y Wicks (1974) presentaron un algoritmo rápido de transición de señal (RAST), diseñado para reducir al mínimo la duración del período de transición en los nodos críticos usando principios básicos de la teoría juegos, de modo que la demanda de tráfico a lo largo de todos los enfoques de cada intersección fuera satisfecha. El tiempo de transición y el flujo de tráfico se consideran dos jugadores que compiten en el juego y se supone que siempre hay un nodo crítico y la transición de este nodo gobierna la turbulencia en la red. El algoritmo se comparó con el algoritmo de transición inmediata (la señal se detiene en verde en la calle principal hasta que el nuevo desplazamiento se alcanza) y el algoritmo de segunda generación (minimiza la



suma de los cambios de desplazamiento que debe ser experimentado en todas las señales en la red). El resultado de la evaluación demostró que el método se compara favorablemente con relación a los demás.

Chang (1987) revisó en detalle el procedimiento de transición del Sistema de Control de Tráfico Urbano (UTCs), presentado por la Administración Federal de Carreteras de USA. El propósito de este algoritmo es reducir al mínimo las perturbaciones totales causadas por el cambio de un plan de semaforización a otro; Por lo tanto, el parámetro óptimo se calcula para minimizar la suma de los cuadrados de las diferencias entre los desfases actuales y los nuevos; de la siguiente manera:

$$X_{\min} = \frac{\sum_{i=1}^N (O_{\text{currenti}} - O_{\text{newi}})^2}{N} \tag{2.1}$$

Donde O_{currenti} es el actual *offset* en el arco i , O_{new} es el nuevo *offset* en el arco i mientras que N es el número de *offsets* en la red. Los *offsets* calculados están sujetos a los mínimos y máximos en el tamaño de la fase en cada intersección; donde C_{new} es la duración del ciclo para el nuevo patrón:

$$\frac{C_{\text{new}}}{2} < (O_{\text{currenti}} - O_{\text{newi}}) < \frac{C_{\text{new}}}{2} \tag{2.2}$$

Abbas, Bullock, Head, & Trb (2001) presentan un algoritmo de transición del *offset* mediante un enfoque de optimización integrado, diseñada para trabajar con sistemas de accionamiento coordinados de la señal de tráfico. El algoritmo fue probado con *hardware* y simulación en bucle y se evalúa con varios controladores. Este algoritmo tiene un procedimiento basado en el tamaño del ciclo utilizado para tabular perfiles de volumen y de ocupación, que luego se pueden utilizar para ajustar los *offsets* o desfases en un sistema de señalización coordinado. El algoritmo calcula la diferencia absoluta en la ocupación y la falta de simetría (*skewness*) de actuación para determinar si la transición del *offset* se justifica:

$$\text{skewness} = \frac{n}{(n-1)(n-2)} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \bar{x}}{\text{stdev}} \right)^3 \tag{2.3}$$



Donde x_i es la i -ésima observación de la variable x , \bar{x} es el valor medio, $stdev$ es la desviación estándar de la variable x , y n es el número de observaciones.

El proceso de sincronización automática puede ser visto como un ajuste del offset de modo que la fase de coordinación se vuelve verde en el momento apropiado. Debido al hecho de que sólo los *offsets* están sincronizados, es difícil para el algoritmo lograr los parámetros óptimos globales o la adaptación rápida a los enfoques basados en modelos; Sin embargo, el algoritmo puede trabajar en el marco de los sistemas de señales coordinadas tradicionales.

Selekwka, Mussa, & A. Chiteshe (2003) presentan una metodología para optimizar el flujo de tráfico durante el período de transición entre planes de temporización TOD basados en la optimización de un modelo cuadrático dinámico, que logra la sincronización de los parámetros de coordinación a través de un número óptimo de ciclos y los incrementos (o decrementos) de los parámetros de optimización. La función de costes utilizados para el óptimo es una suma de los cuadrados de las diferencias:

$$J = \sum_{k=0}^m \Delta\bar{x}(k)^T \Delta\bar{x}(k) = \sum_{k=0}^m u(k)^T B^T B u(k) \tag{2.4}$$

El objetivo es reducir al mínimo J , donde $\Delta\bar{x}$ es la longitud del paso de la transición, m el número de pasos y $\Delta\bar{x}(k) = Bu(k)$. La metodología propuesta tiene por objeto reducir las medidas de desutilidad para los automovilistas durante el período de transición y no es necesario especificar las longitudes mínima y máxima de ciclo en el proceso de optimización. La metodología se compara con el método de transición inmediato instalado en CORSIM, usando la demora en la cola en segundos por vehículo como la medida de desempeño. Los resultados de la simulación mostraron que la metodología propuesta tiene el potencial de reducir la demora en las colas, sobre todo en la calle no principal de la intersección. Entretanto, los retrasos en la calle principal de intersección fueron comparables en ambos escenarios en los que el volumen de tráfico aumentaba o disminuía entre los diferentes planes de tiempo del semáforo.

Lee y Williams (2012) presentan un modelo matemático no lineal que minimiza la demora mediante ajustes incrementales y simultáneos en el *offset* y la longitud de



ciclo durante la transición. En esta investigación, la demora es modelada siguiendo la ecuación propuesta en el *Highway Capacity Manual* (HCM) ("B. National Research Council. Transportation Research.," 2010). La función de minimización se define como sigue:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n {}_iD_j ({}_iC_{j,i} G_{j,i}^k \phi_{j,i} q_j^k) \tag{2.5}$$

Donde i es la intersección, j es el número de paso de la transición, k es la fase, n el número total de pasos de la transición, ${}_iC_{j,i}$ la longitud del ciclo de intersección i en el paso j , $\phi_{j,i}$ el *Offset* de la intersección i en la etapa de transición j , $G_{j,i}^k$ tiempo verde de la fase k de la intersección i en el paso de transición j , q_j^k el flujo de tráfico de la fase k de la intersección i en el paso de transición j , ${}_iD_j$ la demora promedio de la intersección i en el paso de transición j . El modelo incluyó ocho restricciones. El rendimiento promedio de la demora según varios métodos de transición usados en CORSIM (inmediata, de dos tiempos, de tres ciclos, *Add*, *subtract*, *Dwell* y *Shortway*), junto con el método propuesto fue examinado durante el período de transición en diversas condiciones geométricas y de tráfico. Los efectos de la impedancia de intensidad de volumen peatonal en el rendimiento de transición también fueron evaluados comparativamente. Resultados de la simulación mostraron que el método de transición propuesto generalmente muestra el mejor rendimiento para todos los casos de escenarios.

Las clasificaciones restantes se enumeran en la Tabla 4.

2.5. Resultados y discusión

2.5.1. ¿Cuál es el enfoque en el estudio de la transición?

En general, el análisis de la revisión literaria muestra que la mayoría de los artículos trabajan métodos aplicados, fuertemente empíricos, y sólo unos pocos utilizan métodos matemáticos para optimizar la fase de transición. Como se ve en la Tabla 5, el 78,3% de la literatura revisada utiliza los métodos aplicados y sólo el 21,7% aborda métodos matemáticos. Además, la literatura sobre el tema se centra principalmente



en la investigación y el análisis de los métodos existentes en lugar de presentar nuevas soluciones para optimizar la fase de transición.

| Artículos Revisados | Año | (A) | (B) | (C) | (D) | (E) | (F) |
|----------------------------------|------|--------|-------|--------|-------|----------------------------|----------------|
| Lieberman and Wicks | 1974 | II (b) | I, II | II | I | I,IX,X | - |
| Messer, Fambro and Turner | 1976 | I | I | - | - | VI,VII | - |
| Ross | 1977 | I | I | II | I | IV,X | - |
| Bretherton | 1979 | I | I | I | II,V | VI,VIII,X | - |
| McGowan | 1980 | - | IV | - | - | - | - |
| Basu | 1981 | I | III | - | I, II | VIII | - |
| Hunt, Robertson, Bretherton, and | 1981 | I | III | II | - | X | - |
| Chang | 1987 | II (c) | III | - | - | IX | - |
| Balke | 1998 | I | I,II | I, II | - | VIII | - |
| Hamilton | 2000 | I | I | - | - | IV,VIII | I |
| Nelson and Bullock | 2000 | I | I | III | III | IV,VI,VIII | II |
| Obenberger and Collura | 2001 | I | I | III | III | IV,VI,VII,VIII | III |
| Abbas, Bullock and Head | 2001 | II (c) | I, II | II | III | IX | II |
| Selekwa, Mussa and Chiteshe | 2003 | II (d) | I,II | I | III | I,IX | - |
| Sunkari, Engelbrecht and Balke | 2004 | I | I | II | III | IV,V,VI,VII,VIII,X | I, IV |
| Li, Lu and Zhang | 2005 | I | II | I | - | IV,VIII | - |
| Shelby, Bullock and Gettman | 2006 | I | I | II | III | I,II,III,IV,V,VI,VII,VIII | I, II, III, IV |
| Cohen, Head and Shelby | 2007 | I | I | I | III | IV,V,VII,VIII | - |
| Obenberger and Collura | 2007 | I | I | III | III | IV,VI,VII,VIII | III |
| Park, Yun and Best | 2007 | I | I | I, III | IV | IV,VI,VIII | II, V |
| Yun, Best and Park | 2008 | I | I | III | IV | IV,VI,VIII | II, V |
| Yun, Best and Park | 2008 | I | I | I | IV | IV,VI,VIII | II, V |
| Lee and Williams | 2011 | I | I | I, II | III | I,II,III,IV,VI,VII,VIII | - |
| Lee and Williams | 2012 | II | I, II | I, II | III | I,II,III,IV,VI,VII,VIII,IX | - |

Tabla 4. Artículos revisados (1974-2012)

Un análisis más detallado permitió la identificación de dos períodos importantes en el tiempo en los que el número de estudios en transición aumentaron, el primero entre 1970 y 1981 y el segundo desde 1998 a la fecha (Figura 2). Sólo un estudio se hizo en los años entre esos períodos, autoría de Chang (1987) en el que se presentó una revisión del procedimiento de transición del Sistema de Control de Tráfico Urbano (UTCS), pero no propuso una nueva solución para el problema de la transición. Este hecho es representativo de la falta de métodos matemáticos que proporcionan nuevas soluciones al problema de la transición en algunos períodos de tiempo.

Durante el primer período (1970-1981); sólo un método matemático fue propuesto, autoría de Lieberman y Wicks (1974). Durante el segundo período, la misma tendencia se mantuvo, sin embargo, en el tercer periodo se hicieron más intentos para diseñar nuevos métodos matemáticos, incluyendo los de Abbas et al.(2001), Selekwa et al. (2003), y Lee y Williams (2011).



Otro factor relevante encontrado es que los métodos matemáticos existentes tienen como objetivo optimizar sólo una medición de la eficiencia y sólo minimizar los factores secundarios tales como la variación o el tiempo transcurrido en la transición parámetro (Figura. 3). Esto puede ser visto como una desventaja debido a la necesidad de métodos más complejos que permitan asemejarse a las condiciones existentes.

| | |
|-------|--|
| % | (A) ¿Cuál es el enfoque del artículo? |
| 78,3% | I. Métodos Aplicados |
| 21,7% | II. Métodos Matemáticos |
| 20,0% | a) Demora |
| 20,0% | b) Tiempo de Transición |
| 40,0% | c) Desfase |
| 20,0% | d) Desviación de Parámetros óptimos |
| % | (B) ¿Cuál es el propósito de la búsqueda? |
| 65,5% | I. Estudios de Comparación |
| 20,7% | II. Estudios de Diseño |
| 10,3% | III. Estudios de Impacto |
| 3,4% | IV. Estudios/Revisión |
| % | (C) ¿Cuál es modo de operación? |
| 39,1% | I. Transición de tiempo del día (TOD): |
| 39,1% | II. TRSP/ACTS |
| 21,7% | III. Preferencia |
| % | (D) ¿Cuál programa o herramienta de simulación es usado? |
| 15,8% | I. NETSIM |
| 10,5% | II. TRANSYT |
| 52,6% | III. CORSIM |
| 15,8% | IV. VISSIM |
| 5,3% | V. ROSIM |
| % | (E) ¿Cuáles métodos de transición son usados? |
| 6,8% | I. Método de Transición Inmediata |
| 4,1% | II. Método de Transición de dos ciclos |
| 4,1% | III. Método de Transición de tres ciclos |
| 18,9% | IV. <i>Dwell</i> (Espera) |
| 4,1% | V. <i>Maximum Dwell</i> (<i>Max dwell</i>) |
| 16,2% | VI. <i>Add/ Add Only/Longway/Long</i> |
| 10,8% | VII. <i>Subtract</i> |
| 21,6% | VIII. <i>Shortway/Smooth/Bestway/Shortest</i> <i>Minimax/Short-long/Short-route</i> |
| 6,8% | IX. Métodos Teóricos |
| 6,8% | X. Otros métodos |
| % | (F) ¿Cuáles controladores son usados? |
| 17,6% | I. Eagle |
| 35,3% | II. Econolite |
| 17,6% | III. Siemens |
| 11,8% | IV. Naztec |
| 17,6% | V. Mc Cain |

a Porcentajes corresponden al número de veces que cada subdivisión es dirigida dividida por el número total de veces que es dirigida a la categoría

Tabla 5. Lista de preguntas y posibles respuestas

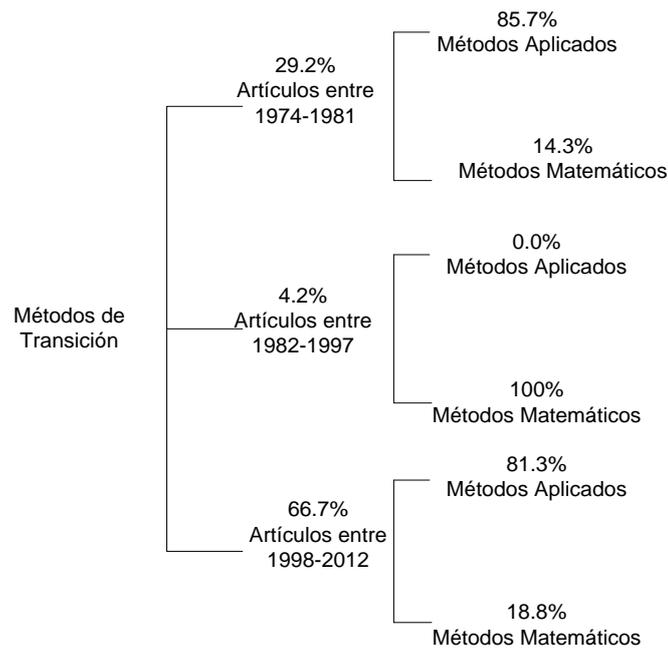


Figura 2. Distribución histórica de artículos de acuerdo a su enfoque de transición.

En general, se identificó una brecha de investigación debido a la falta de estudios en nuevas propuestas de métodos matemáticos para optimizar la fase de transición.

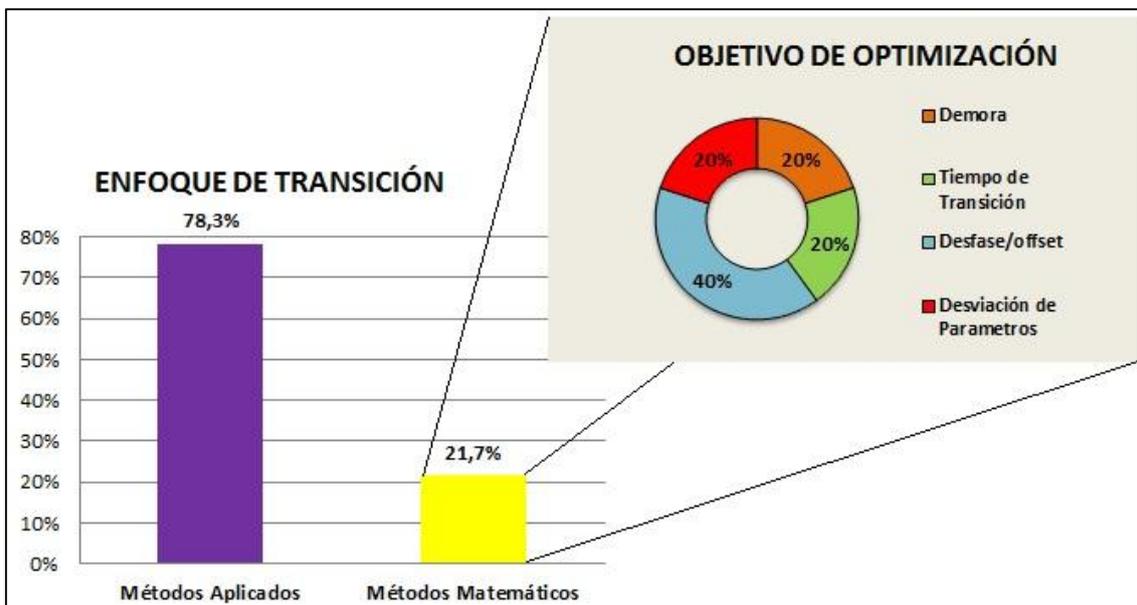


Figura 3. Distribución de artículos de acuerdo al enfoque en el estudio de la transición.

2.5.2. ¿Cuál es el propósito de la investigación?

Como se observa en la Figura 4, el propósito más común de estos estudios es comparar los métodos de transición; estas comparaciones se hacen sobre todo entre los métodos aplicados. La mayoría de los métodos de transición comparados son *Dwell*,



Max Dwell, *Add*, *Subtract* y *Shortway*. Por otro lado, los estudios de diseño e impacto son muy escasos y sólo hay un caso de estudio desarrollado por McGowan (1980). Sin embargo, el mismo es desactualizado para los avances de la época por lo cual su uso es muy limitado.

Estudios de comparación e impacto constituyen el 79% de la literatura revisada lo que sugiere que hay propuestas insuficientes con componentes innovadores que ofrezcan nuevas soluciones al problema de la transición. Esta circunstancia se ve agravada por el hecho de que el único estudio disponible sobre el estado del arte en el tema no está actualizado y por esta razón los investigadores no tienen un punto de partida para acceder al conocimiento sobre las soluciones existentes para el problema de la transición, o alternativas para posibles líneas de investigación.

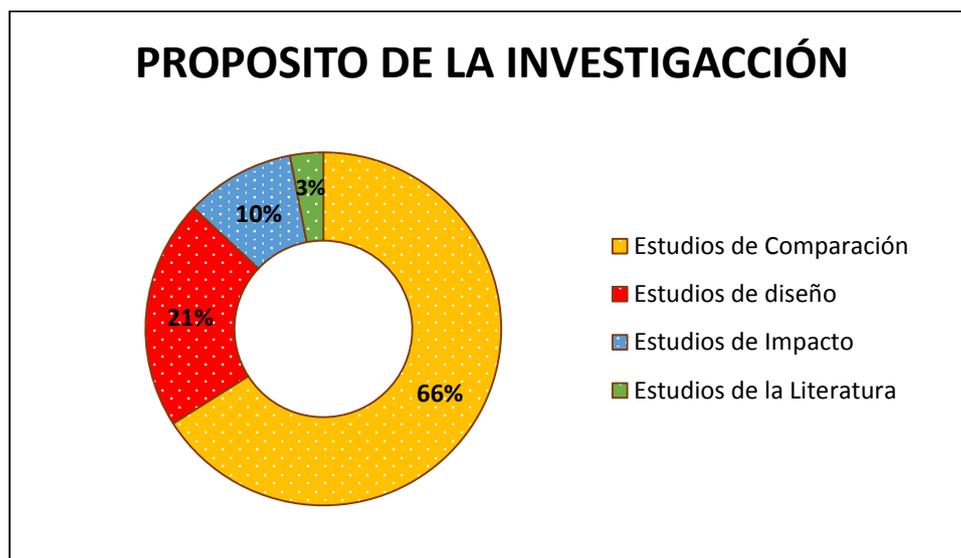


Figura 4. Distribución de artículos de acuerdo al propósito de la Investigación.

Por otra parte, como los estudios de diseño que proponen métodos matemáticos son muy poco frecuentes; los investigadores no han aprovechado al máximo las nuevas técnicas de optimización para determinar los parámetros óptimos. En consecuencia, existe un amplio espacio para las nuevas propuestas en este ámbito mediante el uso de herramientas de ingeniería innovadoras.

2.5.3. ¿Cuál es el modo de operación?

La literatura revisada muestra que la cantidad de estudios que se centraron en el modo de operación TOD es igual a la cantidad de estudios que se centraron en los



modos de respuesta a los patrones de tráfico TRSP (Figura 5). Esto es de esperarse ya que si bien el modo TRSP tiene la ventaja de control de tráfico en tiempo real y la capacidad para adaptarse a condiciones anormales de tráfico (accidentes, eventos especiales y días festivos), el costo de instalación de los controladores en cada intersección es alto. En contraste, el modo de operación TOD tiene un proceso más fácil para configurar y ha demostrado un buen rendimiento cuando el flujo de tráfico es relativamente estable Balke, Rao, y Husted (1998). Como resultado, el modo de operación TOD permanece en uso y continúa siendo estudiado igualmente.

También es importante destacar el interés despertado recientemente en el modo de operación de preferencia que favorece el paso de los vehículos con un grado de prioridad. La mayoría de los estudios que abordan el uso del modo de operación de preferencia han tenido lugar en los últimos años como se ver en la Tabla 4 y la Tabla 5.

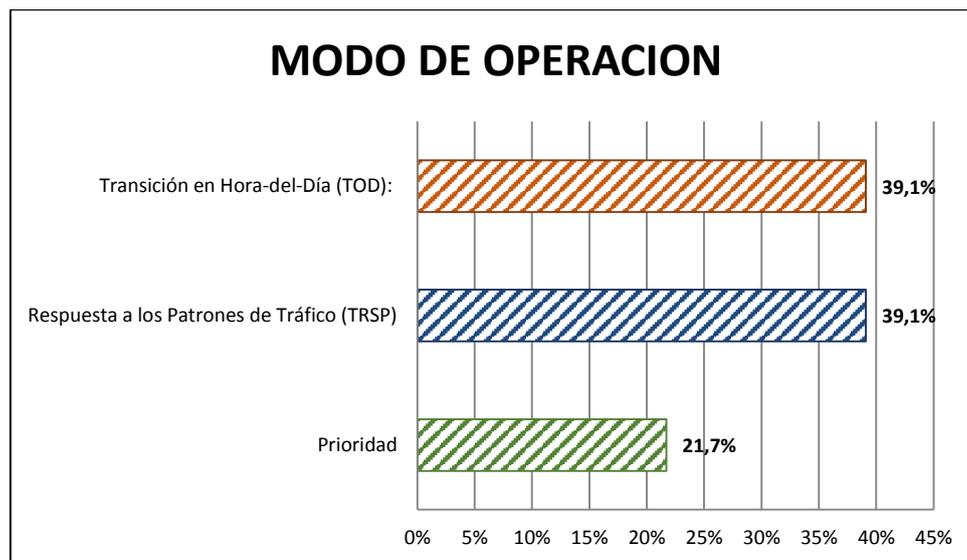


Figura 5. Distribución de artículos de acuerdo con el modo de operación usado.

2.5.4. ¿Cuál programa o herramienta de simulación es usado?

La herramienta de simulación más usada en la literatura es CORSIM. VISSIM, NETSYM y TRANSYT también fueron utilizados pero con menor intensidad (Figura 6). Sin embargo, los estudios que utilizaron CORSIM como la herramienta de simulación como Shelby et al., (2006) y Cohen et al., (2007), evidenciaron problemas con los algoritmos de *Dwell* y *Max Dwell* en la versión 5.2 del *software*. En esta versión, algunas de las señales que empleó el método *Dwell* permanecieron en la fase inicial de permanencia por el tiempo extra esperado en una longitud de ciclo completo, mientras que el



método *Add* sólo extendió la fase coordinada en lugar de ampliar proporcionalmente todas las fases. Cohen et al., (2007) también descubrió algunos problemas con la versión 6.0 con los métodos de transición *Dwell*, *Max Dwell* y *Add*. Los autores afirman que no hay ninguna conclusión sustantiva real, basado en el retardo absoluto y las mediciones de tiempo de viaje de eficacia podrían extraerse del estudio.

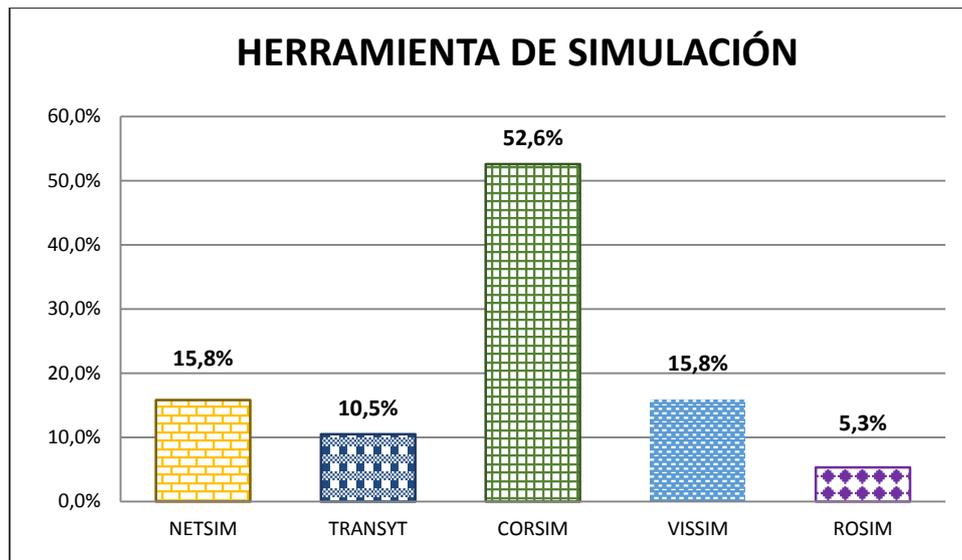


Figura 6. Distribución de artículos de acuerdo con la herramienta de Simulación usada

2.5.5. ¿Cuáles Métodos de Transición son usados?

En la figura 7, se puede observar que los métodos más ampliamente utilizados son los métodos aplicados, especialmente *Shortway*, *Dwell*, *Add* y *Subtract*. Esto está de acuerdo con la evidencia de que la mayoría de los estudios se centran en la evaluación y comparación de los métodos existentes utilizados por los controladores para optimizar la fase de transición en lugar de proponer nuevos métodos para optimizar y lograr mejores medidas de desempeño durante la transición.

Reafirma el hecho que los métodos matemáticos abordados son escasos en comparación con la gran cantidad de métodos aplicados encontrado en la literatura.

En general, el método de transición *Shortway* superó a otros métodos bajo diferentes circunstancias (configuración del controlador, modos de operación, las correcciones de desfase, etc). Estudios de comparaciones, como Hamilton (2000); Nelson y Bullock (2000); Shelby et al. (2006); Yun, Best y Park (2008) y Lee y Williams (2011) concluyeron que dicho método tuvo los mejores resultados.



Sin embargo, otros estudios llegaron a conclusiones diferentes, tales como la investigación llevada a cabo por Ross (1977) que declaró que no había ninguna diferencia esencial entre los métodos *Shortway* y *Dwell* y su efecto sobre las velocidades promedio y las paradas por vehículo. En la misma línea, Obenberger y Collura (2001) encontraron que bajo condiciones de aumento de la demanda de tráfico en una base de cuarenta por ciento no hay diferencias significativas entre los algoritmos de transición *Shortway*, *Dwell* y *Add*.

Por otra parte, *Dwell* se presenta como el método de transición más perjudicial por Shelby *et al.* (2006) y Cohen *et al.* (2007). No obstante, otros estudios como Ross (1977); Obenberger y Collura (2001) y Obenberger y Collura (2007) no consideraron *Dwell* como el peor método, estableciendo su desempeño igual a otros métodos bajo ciertas condiciones. En síntesis, los resultados de diversas investigaciones no son concluyentes sobre la superioridad de uno u otro método.

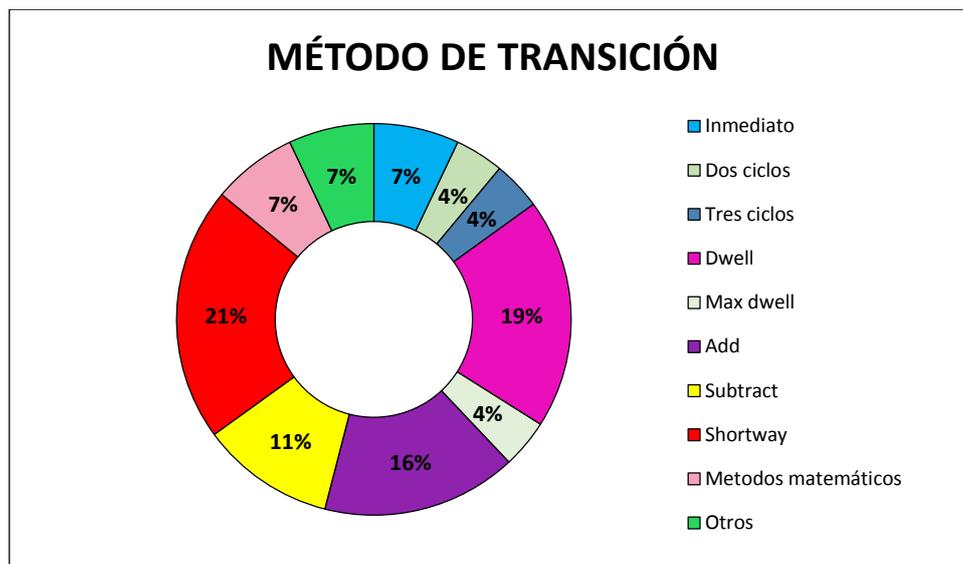


Figura 7. Distribución de artículos de acuerdo con el método de transición usado

2.5.6. ¿Cuáles controladores son usados?

Esta categoría muestra que los productos Econolite son los más ampliamente utilizados, mientras que no hay diferencias significativas en el uso del resto de controladores.

De los artículos revisados, el 35,3% de los artículos usaron controladores Econolite, el 17,6% utilizaron controladores Eagle, 17,6% usaron controladores Mc Cain y otro



17,6% usaron controladores de Siemens, por último el 11,8% de los artículos usaron controladores Naztec (Figura 8).

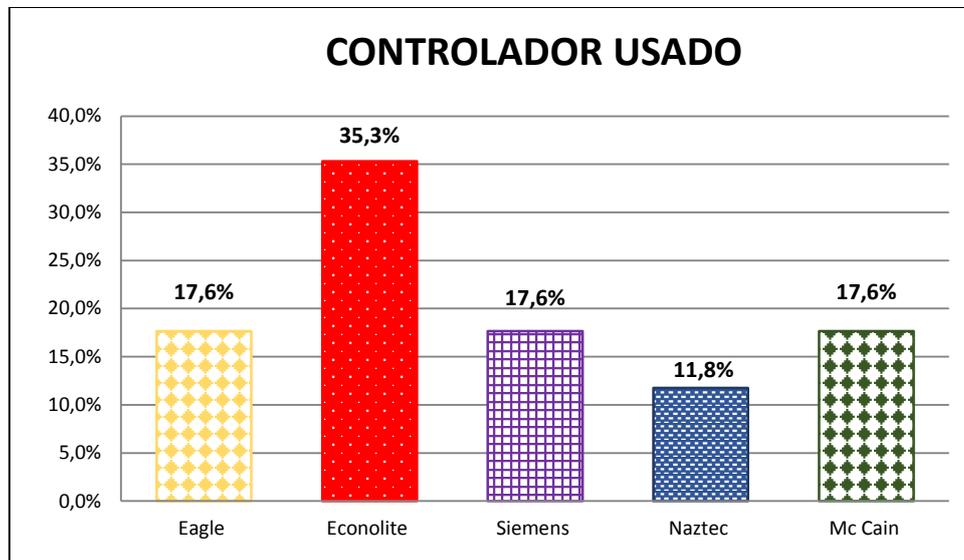


Figura 8. Distribución de artículos de acuerdo con el controlador usado.

Algunos resultados relevantes obtenidos de los estudios que evaluaron o compararon el desempeño de los diferentes controladores se enumeran a continuación:

Sunkari (2004) llegó a la conclusión de que no hubo diferencia estadísticamente significativa entre los métodos de transición en los controladores Eagle respecto al retraso y los tiempos de viaje. Para este tipo de controlador, se recomienda el uso de *Shortway* en lugar de *Dwell* y para los controladores Naztec se recomendó emplear *Short* y *Long* para correcciones de desfases hasta de un 17% por ciclo.

Más tarde, Park, Yun y Best (2008) demostraron que los controladores avanzados (por ejemplo, 2070 y ASC/3) tienen ventajas sobre el controlador 170 para el modo de operación prioritario o de vehículo de emergencia (EVP por sus siglas en inglés). En la comparación de los métodos de transición para el modo de operación TOD en los tres controladores, el controlador 170E superó los controladores 2070 y ASC/3 en la mayor parte de las medidas de desempeño para los dos escenarios de transición estudiados.

En el mismo año, Yun, Best, y Park (2008) evaluaron el rendimiento de los controladores de tráfico "durante transición de la hora del día en los sistemas de señales de accionamiento coordinados. El descubrimiento del inicio más rápido de la operación de transición disponibles en el controlador de ASC/3-2.100 proporcionó



importantes beneficios sobre Econolite 2070 ATC mientras Econolite 2070 ATC superó los controladores McCain 170E y la ASC/3-2100.

Finalmente, Yun *et al.* (2008) evaluaron dos controladores de tráfico, el 170E de McCain y el Econolite 2070 ATC para el modo de operación de EVP. Para el controlador 170E el método de transición *minimax* y el *Shortway* mostraron mejores desempeños y en el controlador 2070 ATC el método *smooth* en general supero a los otros modos de transición.

En cuanto a las herramientas de simulación de tráfico, nuevas versiones de los controladores de tráfico se realizan constantemente y están disponibles para los investigadores. Por lo tanto, el estudio de la transición debe incorporarse la comparación y el análisis de las versiones de los controladores antes mencionados, así como los recientemente lanzados.

2.6. Encuestas de validación con expertos

Para comparar los resultados observados en la literatura con la práctica, una encuesta se llevó a cabo para medir la prevalencia de herramientas y métodos en los sistemas de control de señales de tráfico y el procedimiento de transición en todo el mundo (Ver Anexo 1). La encuesta fue un cuestionario, que incluía preguntas cuantitativas y cualitativas, enviado por correo a 120 investigadores de prestigiosas instituciones seleccionadas al azar entre académicos, especialistas de centros de transporte y consultores. De las encuestas por correo, 35 fueron devueltas parcialmente completas por los investigadores que indicaron que el estudio de sistemas de control de tráfico y el procedimiento de transición no estaba incluido dentro de sus áreas de actuación.

Un total de 37 encuestas fueron totalmente diligenciadas (43% de tasa de retorno utilizable) y se constituyeron en la muestra para este estudio. La mayoría de los participantes fueron del sector educativo (59%), el gobierno (27%), y la empresa privada (14%). Los países participantes dentro de la muestra 17 encuestados de las Américas, 10 encuestados de Europa, 3 encuestados de África, 6 de Asia y por último, 1 de Oceanía (Figura 9).

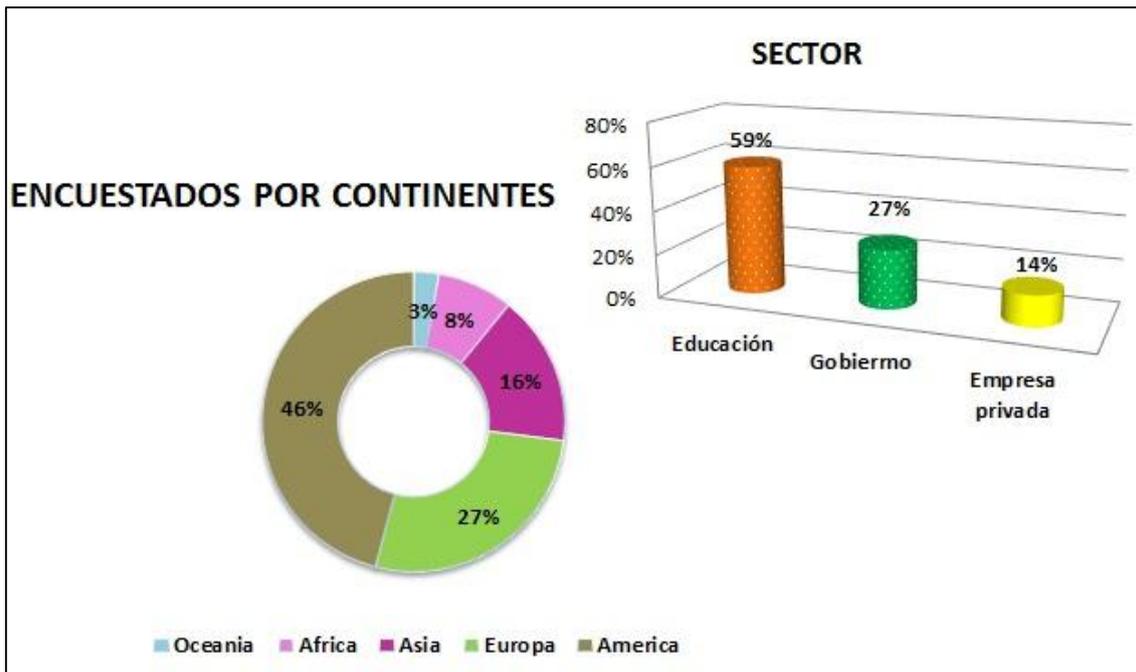


Figura 9. Continentes y sectores encuestados.

Las respuestas de la encuesta (Figura 10) indican que el modo operación más utilizado por los investigadores especializados y profesionales en el área, muestra una pequeña prevalencia del TOD (51%) en comparación con TRSP (49%), lo que contrasta con la revisión de la literatura que sugiere exactamente la misma prevalencia entre estos modos de funcionamiento. Lo anterior refuerza el hecho de que a pesar del escaso uso de TRSP por parte de los investigadores porque es considerado complejo y costoso e implica el mantenimiento de la infraestructura (Stevanovic, 2010). Las grandes ventajas que implica su uso han permitido que su aplicación vaya en aumento en las principales ciudades y por ende se convierta en un necesario tema de estudio.

Al analizar las respuestas de la herramienta de simulación o *software* utilizado (Figura 11), se observó que el *software* más usado es VISSIM (39%). Este resultado difiere de la literatura, que se ha centrado en CORSIM (52,6%). Como se documenta en Bloomberg y Dale (2000), la interfaz gráfica de VISSIM es más comercial y permite una mayor flexibilidad para la recogida de datos. No obstante, no hay grandes diferencias en cuanto a los resultados y capacidades.

Al referirse al método de transición, el método más usado es el inmediato (34%), pero vale la pena descartar que un importante número de investigadores y profesionales (23%) mencionó no conocer el método de transición utilizado. Esta tendencia se puede



interpretar como resultado a que muchos de los métodos se encuentran predeterminados en controladores y/o *software*. Por otra parte, el método de transición DWELL que prevalece como el de mayor uso en la literatura, su frecuencia de uso dentro de los encuestados no fue tan alta (12%) (Figura 12).

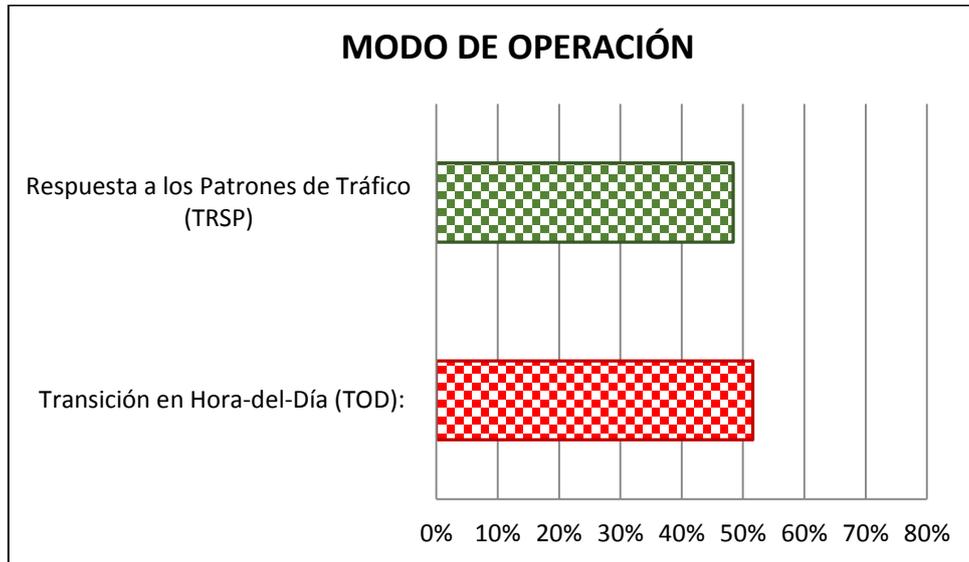


Figura 10. Distribución de respuestas de acuerdo con el modo de operación usado.

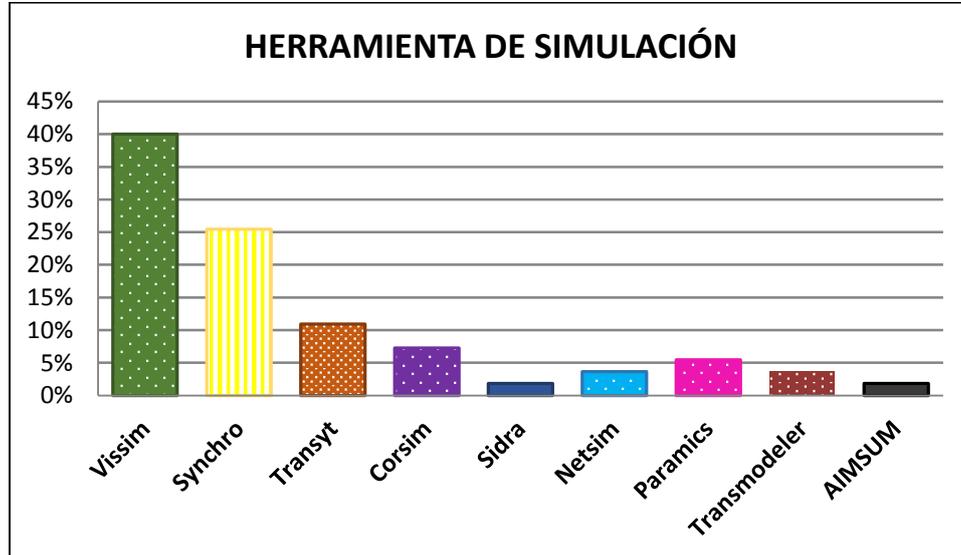


Figura 11. Distribución de respuestas de acuerdo con la herramienta de simulación usada.

La preferencia por el modelo Econolite para los controladores de tránsito es persistente en la encuesta (27%) y la literatura (35,3%). Sin embargo, el modelo Siemens presenta un frecuencia de uso por parte de los encuestados de un 32% (Figura 13), lo que sugiere una tendencia al uso en esta marca.

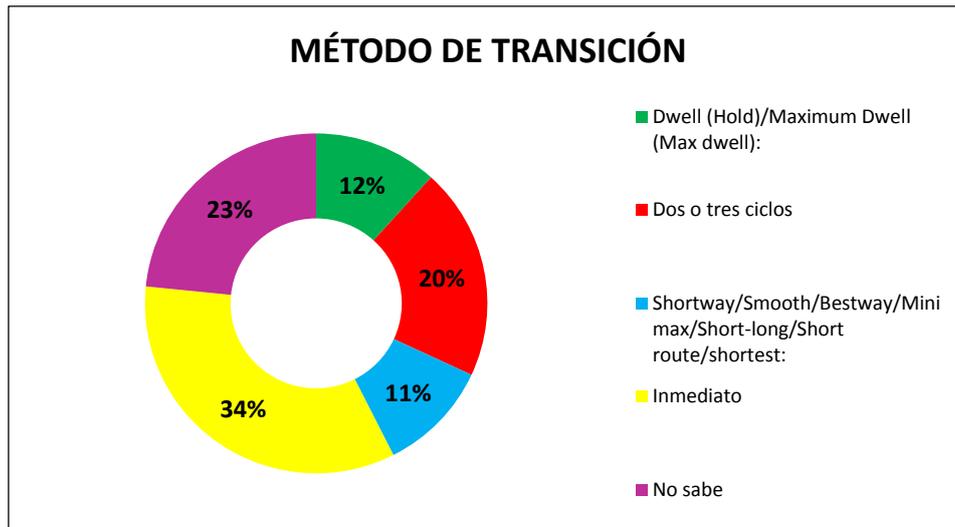


Figura 12. Distribución de respuestas de acuerdo con el método de transición usado.

Por otra parte, se incluyó en el estudio una pregunta para valorar si los encuestados consideraban que "la transición entre planes de semaforización era una problemática que requería de más estudio por parte de los investigadores" la respuesta a esta pregunta se valoraba en una escala de 5 puntos (1 = totalmente en desacuerdo y 5 = muy de acuerdo). Así, el 49% de los investigadores especializados y profesionales encuestados respondieron estar de acuerdo ("algo de acuerdo" y "totalmente de acuerdo") que la transición entre los planes de temporización es un problema no resuelto, y el 19% no está de acuerdo o en desacuerdo con esta afirmación .

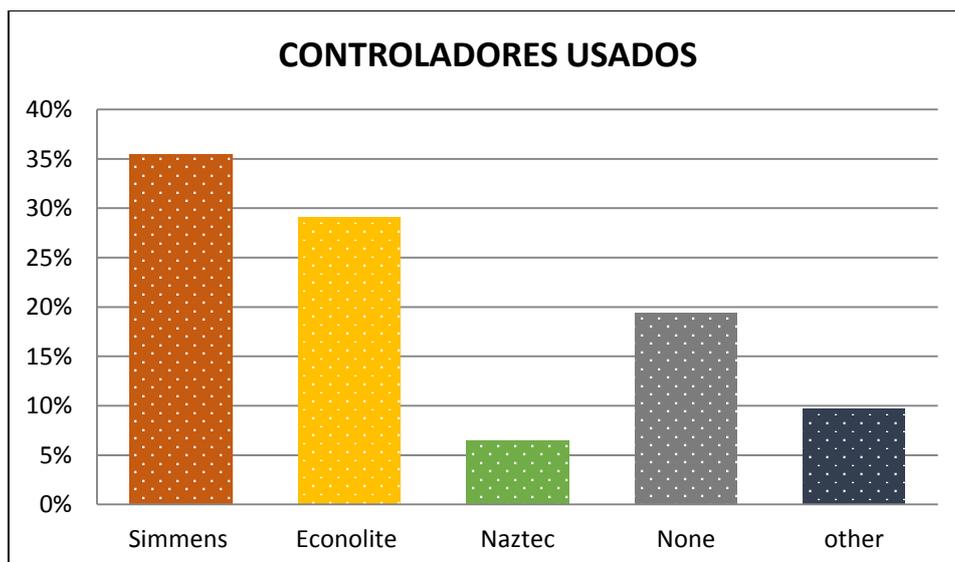


Figura 13. Distribución de respuestas de acuerdo con el método de transición usado.



2.7. Conclusiones parciales

En este capítulo se presentó un análisis de la problemática de la transición entre planes de semaforización utilizando una metodología basada en un método de clasificación, con el propósito de proporcionar un resumen completo de la situación actual del problema, destacar las brechas existentes de investigación y, finalmente, obtener un punto de partida para estudiar más a fondo los métodos de transición existentes y/o aportar nuevas soluciones al problema de la transición.

Los artículos considerados cubren el período entre 1974 y 2012 y a partir del análisis de las categorías resultantes de los mismos. Se concluyó que TOD y los modos de operación respuesta a los Patrones de Tráfico (TRSP) han sido estudiados por igual y que TOD es el modo de operación más comúnmente utilizado debido a su rendimiento en entornos estables y su menor coste de implementación. Por otro lado, se ha incrementado el interés en los modos de operación de preferencia durante los últimos años y si la tendencia permanece este debe convertirse en un importante tema de estudio en el futuro.

Los métodos *Shortway*, *Add*, *Subtract* y *Dwell* son los métodos de transición más estudiados. Por lo general, *Shortway* superó a otros métodos en diferentes circunstancias y el método *Dwell* a menudo causó niveles medios o altos de interrupción.

Los resultados también mostraron que la herramienta de simulación CORSIM y los controladores Econolite son los más ampliamente utilizados en modelos basados HILS y SILS. Sin embargo, la disponibilidad de nuevos controladores y herramientas de simulación que incluyen nuevas funciones y características permiten apoyar el proceso de investigación con herramientas que se adaptan mejor a las condiciones actuales de tráfico. En consecuencia, el estudio de la transición debería ampliarse para incluir el análisis de las versiones más actuales de los controladores y herramientas de simulación de tráfico.

Como ya han señalado varios autores, deben llevarse a cabo más investigaciones en el tema de la transición entre planes de semaforización. Además, se identificó una



importante brecha de investigación a través de este análisis porque pocas investigaciones han abordaban los métodos matemáticos y los que lo hicieron tenían modelos relativamente simples y objetivos de optimización limitada, donde predominan los métodos empíricos; dejando así un amplio espacio para las nuevas propuestas que aporten soluciones para el problema de la transición.

Así una de las principales conclusiones establecidas en el desarrollo de este capítulo es el hallazgo de una brecha en cuanto al desarrollo de modelos matemáticos que representen la transición entre planes de semaforización y la necesidad de aplicar y optimizar funciones con múltiples objetivos que permitan evaluar la eficiencia de los mismos.





Capítulo 3

ANÁLISIS DE MODELOS PARA LA FUNCIÓN COSTO SOCIAL





3. ANALISIS DE MODELOS PARA LA FUNCIÓN COSTO SOCIAL

El diseño de políticas de control de tráfico, requiere que las intersecciones semaforizadas funcionen de forma óptima en todo momento, incluso durante las fases de transición entre planes de semaforización. Sin embargo como evidencia la literatura, hay una falta de estudios con respecto a la transición entre los planes de tiempos de los semáforos.

Como resultado, surge la necesidad de diseñar modelos matemáticas más complejos, que se asemejen de forma más precisa a las condiciones existentes y que sirvan como funciones capaces de medir el desempeño de las señales de tráfico en las arterias con intersecciones coordinadas.

El objetivo de este capítulo es revisar el marco teórico y la literatura existente sobre los modelos actuales para medir el desempeño y la eficiencia de los sistemas de tráfico, para de esta forma levantar el marco de referencia que permita construir un modelo matemático con miras a la minimización de los costos sociales asociados al tráfico vehicular.



3.1. Introducción

Las intersecciones de tráfico son las áreas diseñadas para que los vehículos transiten en diferentes direcciones sin generar conflictos y generalmente están sujetas a las políticas de control de tráfico (semáforos, paradas, etc.). Los usuarios de las intersecciones de tráfico pueden estar expuestos a un retraso o demora, formación de filas y ciclos de cambios de velocidad, debido a la presencia de las señales de tráfico.

Por lo tanto, en el diseño de políticas de control de tráfico, se requiere que las intersecciones con señales coordinadas operen de forma óptima en todo momento, incluso durante las fases de transición entre planes de semaforización (Selekwa *et al.*, 2003). Sin embargo como evidencia la literatura, hay una falta de estudios con respecto a la transición. Como resultado, surge la necesidad de un método matemático más complejo capaz de parecerse de una forma más precisa a las condiciones existentes. El modelo matemático debe tener en cuenta la minimización de los costos sociales y debe incluir dentro de sus componentes la reducción en la demora, las emisiones de gases y el consumo de combustible.

Hay muchas justificaciones para el diseño y utilización de un modelo matemático de este tipo, ya que se trataría de un enfoque rentable para reducir problemas como el tiempo de viaje excesivo, las emisiones contaminantes y el consumo de combustible.

El modelo debe estar orientado a generar una amplia gama de beneficios directos e indirectos. Principalmente minimizar el costo relacionado con la demora, las emisiones de gases al ambiente y el consumo de combustible. Sin embargo, este enfoque debe también conducir a una reducción de kilometraje que disminuye la depreciación del vehículo, desgaste y desgarre, el costo del petróleo y el costo de mantenimiento (reparación y sustitución).

Además, el consumo de recursos no renovables reduce cada vez más su disponibilidad para las generaciones futuras. La importación de recursos impone costos económicos (reducción de empleo, de la actividad empresarial y de la inversión), y la dependencia del combustible extranjero puede crear riesgos de seguridad nacional.



Por otra parte, la contaminación del aire tiene varias consecuencias negativas, tales como la enfermedad humana, la discapacidad y la muerte, y varios tipos de daños ecológicos. Además, la contaminación acústica provoca distracción y el estrés, y por lo tanto reduce el valor de las propiedades a lo largo de las carreteras con tráfico pesado (Litman, 2013).

Para cumplir con el objetivo principal de esta investigación la ecuación del nuevo modelo matemático, debe minimizar los costos sociales, y tener un enfoque multi-objetivo con tres componentes que correspondan al retraso, el consumo de combustible y el costo de emisión a la atmósfera durante la fase de transición. Para tal efecto en este capítulo se revisa el marco teórico y la literatura existente sobre los modelos actuales para medir el desempeño y la eficiencia de los sistemas de tráfico, desde el punto de vista de la demora, consumo de combustible y emisiones de gases a la atmosfera. Para el mejor entendimiento de los mismos a continuación se relaciona un resumen de la nomenclatura para las variables y parámetros asociados a los modelos estudiados:

Nomenclatura

d = Control de demora por vehículo (s/veh),

D = Demora total

d_1 = Control de demora uniforme asumiendo llegadas uniformes (s/veh),

PF = Factor de ajuste de la progresión de demora uniforme,

d_2 = Demora incremental para explicar el efecto de llegadas aleatorias y sobresaturación de las filas, ajustado por la duración del período de análisis y el tipo de la señal de control (s/veh),

d_3 = Demora de la fila inicial, que representa el retraso de todos los vehículos en el período de análisis debido a la fila inicial al comienzo del período de análisis (s/veh),

P = Proporción de vehículos que llegan en verde (0-1),

f_{PA} = Factor de ajuste suplementario para el pelotón que durante la señal verde,

AT = Tipos de llegada,



- g = Tiempo en verde para grupos de carril,
- g_i = Tiempo en verde para el grupo del carril i (s),
- C = Duración del ciclo (s),
- $X = v/c$ Proporción o grado de saturación para el grupo de carriles,
- q = Tasa de flujo de demanda real o proyectada,
- q_i = Tasa de flujo de demanda real o proyectada para el grupo del carril i (veh/h),
- s_i = Tasa de flujo de saturación para el grupo del carril i (veh/h),
- T = Duración del período de análisis (h),
- k = Factor de retraso incremental que depende de la configuración del controlador,
- I = Factor de ajuste de filtrado/medición ascendente,
- Q_b = Fila inicial,
- QT = Capacidad disponible en T,
- t = Duración de la demanda insatisfecha en T (h),
- r = Parámetro de demora,
- Rp = Tasa de rango del pelotón,
- F = Consumo promedio de combustible por vehículo (ml),
- F_c = Consumo de combustible mientras conduce (ml),
- F_s = Consumo de combustible en espera (ml),
- F_h = Combustible consumido durante las maniobras de parada-arranque (ml),
- φ_1 = Consumo de combustible por unidad de distancia mientras que conduce (ml/km),
- x_c = Distancia recorrida mientras que la conducción es ininterrumpida por los dispositivos de control de tráfico (km),
- x_h = Distancia promedio de desaceleración-aceleración por parada,
- x_s = Distancia total sección,



$$\varphi_1 = f_1,$$

$$\varphi_2 = f_2,$$

$$(\varphi_3 - \varphi_1 x_h) = f_3,$$

f_3 = Exceso de la tasa de consumo de combustible por parada lo que significa el consumo absoluto por parada menos el consumo si la distancia de desaceleración-aceleración se viaja a la velocidad de conducción,

φ_2 = Consumo de combustible por unidad de tiempo en espera (ml/s),

d_s = Tiempo de espera (s),

d_h = Retraso promedio de desaceleración-aceleración por parada,

$f_3 - f_2 d_h (f'_3)$ = Exceso de la tasa ajustada de consumo de combustible por parada,

t_h = Tiempo de desaceleración-aceleración (s),

d_h = Demora de desaceleración-aceleración (s),

x_h = Distancia de desaceleración-aceleración (km),

v_c = Velocidad de conducción (km/h),

a_h = Promedio de la velocidad de desaceleración-aceleración por parada (media armónica de a_1 y a_2),

φ_3 = Consumo real de combustible por 'parada', es decir, una maniobra completa de parada-arranque que implica una desaceleración de una (conducir) velocidad inicial, a velocidad cero y una aceleración de nuevo a una (conducir) velocidad final,

h = Número de paradas efectivas,

qC = Número promedio de llegadas en vehículos por ciclo,

u = Proporción de tiempo en verde (g/C),

y = Tasa de flujo,

N_0 = Promedio de fila desbordada,

Constante (0.9) = Factor de reducción para permitir paradas parciales,



Q = Capacidad en vehículos por hora,

T_f = Período de flujo, el intervalo de tiempo en horas en el que una tasa de flujo de llegadas promedio (q) persiste,

$Q * T_f$ = Rendimiento, número máximo de vehículos que pueden ser liberados durante el intervalo T_f ,

X = Grado de saturación (q/Q),

$z = X - 1$,

X_0 = Grado de saturación por debajo del cual la saturación promedio de la fila desbordada es aproximadamente cero,

H = Número promedio de paradas por vehículo,

q = Tasa de flujo de llegadas (veh/s),

s = Velocidad de flujo de saturación,

E = Estadístico de interés, por ejemplo, las emisiones totales,

l_1 = Tasas promedio de conducir, demora y paradas,

l_2 = Tasas promedio de demora, y

l_3 = Tasas promedio para las paradas.

3.2. Modelos para la demora

La demora puede ser descrita como la cantidad de tiempo utilizado en atravesar la intersección (desde la llegada del vehículo hasta la salida del mismo). Las medidas para la demora se pueden calcular para un solo vehículo, como un promedio para todos los vehículos por un periodo de tiempo especificado, o como un valor total agregado para todos los vehículos por un período de tiempo especificado.

La demora es una de las medidas más utilizadas para evaluar la eficiencia en el control de tráfico, de la que pueden derivarse mediciones secundarias como las emisiones contaminantes y el consumo de combustible.

Según McShane, Roess y Prassas (2011), hay cinco tipos de demora o retardo:



1. Demora por tiempo detenido o en parada: se define como el tiempo que un vehículo está detenido en la fila a la espera de pasar a través de la intersección; el promedio de demora del tiempo detenido es el promedio para todos los vehículos durante un período de tiempo especificado.
2. Demora en la cercanía a la parada: Incluye la demora del tiempo detenido y tiempo perdido debido a la velocidad de desaceleración por la aproximación a una parada y el tiempo perdido debido a la aceleración a la velocidad deseada. La demora en la cercanía a la parada promedio se define como la media de todos los vehículos durante un período de tiempo especificado.
3. Tiempo de demora en fila: Se define como el tiempo total de un vehículo en unirse a una fila de intersección hasta su liberación a través de la línea de parada a la salida. El tiempo promedio de demora en cola es el promedio para todos los vehículos durante un período de tiempo especificado.
4. Demora en el tiempo de viaje: Es la diferencia entre el tiempo de viaje esperado de los conductores a través de la intersección (o cualquier segmento de carretera) y el tiempo real tomado. Este valor se utiliza raramente debido a la dificultad de estimar el tiempo de viaje deseado para cruzar una intersección.
5. Demora por control: Se define como el retraso causado por un dispositivo de control, tales como señales de tráfico, señal de stop, etc. Consiste en el tiempo de demora en la cola más el componente de demora de aceleración-deceleración. El concepto de demora por control fue desarrollado en el Manual de Capacidad de Carreteras 1994, y que fue incluido más tarde el HCM2000.

Por otra parte, en el análisis de las señales de tráfico, la demora al tráfico se calcula como la suma de tres componentes: uniformidad, aleatorización, demora por exceso de flujo. La demora uniforme es el retraso basado en el supuesto de llegadas uniformes, flujo estable sin fallas en el ciclo individual y sin fila inicial. La demora aleatoria es el flujo de retraso adicional cuando el flujo está aleatoriamente distribuido en las intersecciones aisladas. Finalmente, demora por exceso de flujo es el retraso



adicional cuando la capacidad de una fase individual o una serie de fases es menor que la tasa de flujo o la demanda de la llegada.

Los problemas de estimación de la demora en las intersecciones con semáforos han sido ampliamente estudiados en la literatura. Beckman (1956) fue el primero en estimar el retraso esperado en señales de tiempo fijo. El modelo asume un proceso de llegada binomial y un servicio determinístico:

$$d = \frac{c - g}{c(1 - \frac{q}{s})} \left[\frac{Q_0}{q} + \frac{c - g + 1}{2} \right] \quad (3.1)$$

Donde d es el retardo promedio por vehículo (s/veh), c es la longitud del ciclo (s), g es el tiempo en verde efectivo (s), q es la demanda de tráfico (veh/h), s es el flujo de saturación (veh/h) y Q_0 es la fila desbordada esperada del ciclo anterior. La suposición de un proceso de llegada binomial y el valor esperado de extra flujo considerado en la fórmula reduce la aplicabilidad del modelo.

Otro modelo de demora fue presentado por Webster (1958); en el que se usa un enfoque sistemático para la estimación del retraso en la intersección antes de tiempo mediante el uso de un análisis de filas determinística. Este modelo se convirtió en el modelo básico para todos los modelos de demoras posteriores:

$$d = \frac{c(1 - \lambda)^2}{2(1 - \lambda x)} + \frac{x^2}{2q(1 - x)} - 0.65 \left(\frac{c}{q^2} \right)^{\frac{1}{3}} x^{(2+5\lambda)} \quad (3.2)$$

Donde d es el retraso promedio por vehículo (s/veh), q es la demanda de tráfico (veh/h), c es la longitud del ciclo (s), g es el tiempo en verde (s), $\lambda = g/c$ es la proporción efectiva en verde, s es el flujo de saturación (veh/h), y $x=q/\lambda$ es la saturación en verde. En la ecuación, el primer término cuenta para las llegadas uniformes, el segundo representa las llegadas aleatorias, y el último es un ajuste basado en los resultados de la simulación.

Akçelik (1983) expresa la demora total en una señal de tiempo fijo aislado como:

$$D = \frac{qc(1 - u)^2}{2(1 - y)} + N_0 x \quad (3.3)$$



Donde D es el retraso total, q_c es el número promedio de llegadas por ciclo, u es la tasa de tiempo en verde, y la tasa de flujo y N_0 es el promedio de flujo de fila en vehículos. Además, presentó una fórmula general para el retraso promedio por ciclo:

$$d = \frac{D}{q} \tag{3.4}$$

Donde D es la demora total y q es el flujo en vehículos por segundo.

Otro modelo importante es el Highway Capacity Manual (HCM) modelo 2000, que describe el retraso promedio por control como la medida de rendimiento principal para las intersecciones señalizadas (Darma, Karim, Mohamad, & Abdullah, 2005).

El modelo es aplicable a las señales tanto pre-programadas y accionados mediante diferentes parámetros del modelo. Este modelo calcula el retraso promedio por control por vehículo utilizando la siguiente ecuación:

$$d = d_1(PF) + d_2 + d_3 \tag{3.5}$$

Donde d es el retraso por control por vehículo (s/veh), d_1 es el retraso por control uniforme suponiendo llegadas uniformes (s/veh), PF es el factor de ajuste de progresión que representa los efectos de la progresión de la señal, d_2 es el retraso incremental para tener en cuenta los efectos debidos a las llegadas aleatorias y sobre-saturación de filas (s/veh) y d_3 es el retraso de la fila inicial que representa el retraso debido a la cola inicial al comienzo del período de análisis (s/veh). El factor de progresión está dada por:

$$PF = \frac{(1 - P)f_{PA}}{1 - \frac{g}{c}} \tag{3.6}$$

Donde P es la proporción de vehículos que llegan en verde, g/c es la proporción del tiempo disponible en verde y f_{PA} es el factor de ajuste suplementario para la llegada del pelotón mientras está en verde.

Los modelos de demora Webster, HCM y Alcelik descritos anteriormente son los preferidos por los ingenieros de tráfico para estimar la demora (Murat & Baskan, 2006). Las fórmulas de HCM y Akçelik dan resultados más razonables en comparación con el método de Webster, sin embargo, las estimaciones de estos dos modelos no



incluyen la demora por sobre-saturación debido a los parámetros no definidos en el problema como el comportamiento del conductor, la edad, la educación, tipo de llegada y otros (Murat & Baskan, 2006).

Se describen otros modelos de demora brevemente a continuación: McNeil (1968) deriva una fórmula para el retraso esperado de la señal asumiendo un proceso general de llegada y una hora de salida constante. Michalopoulos y Pisharody (1981) y Michalopoulos y Pisharody (1981) desarrollaron un algoritmo de control de tráfico para minimizar la demora total en las intersecciones aisladas basadas en la teoría de onda de choque. Olszewski (1993) desarrolló un método numérico para calcular el retraso promedio y la distribución dependiente del tiempo de la media de retraso cíclico. Han (1996) presentó un enfoque alternativo para el problema de la optimización de la configuración de la señal de tráfico de tiempo fijo en una unión aislada para un único período de tiempo, donde el grado de saturación para cada flujo de tráfico puede ser mayor que uno o menor que uno. Fu y Hellinga (2000) desarrollaron un modelo analítico para estimar la varianza del retardo global, incluyendo la varianza de los retrasos uniformes y la varianza de retrasos aleatorios. Chang (2000) también desarrolló el modelo de retraso de intersecciones señalizadas bajo el estado de saturación de tráfico, sobre la base del triángulo de retraso, y estableció el modelo de parámetros de control de optimización en tiempo real dirigido al retraso mínimo. Benekohal y El-Zohairy (2001) diseñaron un modelo de demoras Multirégimen de llegadas uniforme para intersecciones señalizadas. Su et al., (2009) presentaron un modelo de estimación de retraso simplificado que considera los tipos de vehículos y las posiciones en la fila y los efectos de los peatones y las bicicletas.

3.3.El Modelo de demora de HCM 2000

La demora describe la cantidad de tiempo consumido mientras que el conductor atraviesa a través de una intersección. Como se ha señalado anteriormente, hay varias maneras diferentes de definir la demora tales como demora por tiempo detenido, demora aproximada, demora del tiempo de viaje, demora del tiempo en fila y la demora por control.



El modelo de demora desarrollado en el *Manual Highway Capacity* (HCM) de 2000 ("B. National Research Council. Transportation Research.," 2010) es uno de los modelos de retraso de tiempo más comúnmente utilizados, en investigaciones con el objetivo de minimizar este tiempo. En 1994 HCM define el nivel de servicio (LOS) de una intersección con base en la demora por tiempo detenido. Más tarde en HCM 2000, el parámetro se cambia para controlar la demora. Por consiguiente, el retraso promedio por control por vehículo para un grupo de carril determinado está dado por:

$$d = d_1 * (PF) + d_2 + d_3 \quad (3.7)$$

Donde

d = Demora por control por vehículo (s/veh),

d_1 = Demora por control uniforme asumiendo llegadas uniformes (s/veh),

PF = Factor de progresión de ajuste de demora uniforme,

d_2 = Demora incremental para explicar el efecto de las llegadas aleatorias y colas sobrecargadas, ajustado por la duración del período de análisis y el tipo de control de la señal (s/veh) y

d_3 = Demora de la cola inicial, que representa el retraso a todos los vehículos en el período de análisis, debido a la cola inicial al comienzo del período de análisis (s/veh)

El retardo total se puede expresar como:

$$D = qd \quad (3.8)$$

Donde,

q = Demanda total.

Por lo tanto;

$$D = q * [d_1 * (PF) + d_2 + d_3] \quad (3.9)$$

Cada uno de los componentes de la anterior ecuación será explicado en detalle a continuación.

Factor de progresión ajustado (PF). El modelo aborda el efecto de la progresión en la demora multiplicando el retraso calculado para las llegadas uniformes por un factor de



progresión (PF). El factor de progresión afecta principalmente a la demora uniforme; Por lo tanto, el ajuste sólo se aplica a d_1 .

El factor de progresión está dada por:

$$PF = \frac{(1 - P) * f_{PA}}{1 - \left(\frac{g}{C}\right)} \quad (3.10)$$

Donde,

P = Proporción of vehículos que llegaron en verde (0-1),

g/C = Proporción de tiempo disponible en verde, y

f_{PA} = Factor de ajuste suplementario para el peloton que llegaron en verde.

Tipos de Llegada (AT): Los tipos de llegadas descritos por HCM (2000) son definidos a continuación:

- Llegada Tipo 1: Este tipo se caracteriza por la llegada de un pelotón denso y representa los enlaces de red que experimenta una tasa pobre de progresión debido a varias condiciones, incluyendo la falta de coordinación. El pelotón consta de más del 80% del volumen de llegadas de un grupo de carriles al comienzo de la fase de color rojo.
- Llegada Tipo 2: Este tipo de llegada se caracteriza por un pelotón moderadamente denso y representa una progresión desfavorable a lo largo de una calle urbana. El pelotón llega a la mitad de la fase de color rojo o se compone de un pelotón disperso de 40% a 80% del volumen de llegadas de un grupo de carriles durante toda la fase de color rojo.
- Llegada Tipo 3: Este tipo de llegada es de tipo aleatoria en la que el pelotón principal contiene menos de 40% del volumen del grupo de carriles y que representa las operaciones en las intersecciones señalizadas no interconectadas, con pelotones altamente dispersados. También se utiliza para representar una operación coordinada con beneficios mínimos de progresión.
- Tipo de llegada 4: Este tipo de llegada se caracteriza por un pelotón moderadamente denso y representa una progresión favorable a lo largo de una calle urbana El pelotón llega a la mitad de la fase verde o se compone de un



pelotón disperso de 40% a 80% del volumen de llegada del grupo del carril a través de la fase verde.

- Llegada Tipo 5: Este tipo de llegada se caracteriza por un pelotón denso a moderadamente denso y que representa una progresión muy favorable, lo que puede ocurrir en las rutas con un número bajo a moderado de las entradas a la calle y que reciben una alta prioridad en la señal de semaforización. El pelotón se compone de más de 80% del volumen de llegada del grupo de carriles al inicio de la fase verde.
- Llegada Tipo 6: Este tipo de llegada se caracteriza por la calidad de progresión excepcional en las rutas con características casi ideales y representa pelotones densos que progresan durante varias intersecciones muy próximas entre sí.

Proporción de vehículos que llegan en verde (*P*). La proporción de vehículos que llegan en verde se puede calcular en el campo mediante la determinación de la proporción de vehículos en el ciclo que llegan a la línea de parada o unidos a la fila (estacionaria o móvil), mientras que la fase verde se muestra. Si no, la proporción de vehículos que llegan en verde puede estimarse a partir del tipo de la llegada.

Rango de Tasa del Pelotón (*Rp*). El rango de la tasa del pelotón se utiliza para cuantificar la calidad de la progresión en una aproximación. El rango de la tasa del pelotón se calcula como sigue:

$$Rp = \frac{P}{\frac{g_i}{C}} \tag{3.11}$$

Donde,

P= Porcentaje de vehículos que llegan en verde

g_i = Tiempo eficaz en verde para el grupo de carriles *i*, y

C = Longitud del ciclo (s)

El modelo define seis tipos diferentes de llegada numerados del 1 al 6 por varias calidades de progresión, y define un rango de tasas de pelotón, que representan cada tipo de llegada, con una tasa de pelotón promedio para cada uno.



Para las llegadas uniformes, $P = \frac{g}{C}$ entonces $Rp = 1$. Usando la tasa promedio de pelotón para un tipo dado de llegada, P se puede calcular mediante la inversión de la definición de Rp anterior [$P = Rp(g/C) \leq 1.0$] y este valor P se puede utilizar en la fórmula de PF anterior (utilizando un valor prescrito para cada tipo de la llegada).

Factor de ajuste suplementario para llegar el pelotón durante la fase verde. (f_{PA}). En el modelo de HCM de 1994, el PF ajustado fue retirado del término demora incremental (d_2) y fue aplicado sólo para el término d_1 . Además, se añadió el factor f_{PA} . Este factor de ajuste suplementario se utiliza para las llegadas del pelotón tempranas o tardías. El valor de f_{PA} se basa en el tipo de llegada.

Proporción de tiempo disponible en verde o tasa eficaz en verde (u). La proporción de tiempo disponible en verde es la relación del tiempo eficaz en verde de una fase a la duración del ciclo. La proporción de tiempo disponible en verde está dada por:

$$u = \frac{g}{C} \tag{3.12}$$

Donde

g = Tiempo eficaz en verde para grupos de carriles, que consiste en la parte de color verde donde los flujos se mantienen en el nivel de la tasa de flujo de saturación.

C = Longitud de ciclo (s)

Demora Uniforme (d_1). Demora uniforme (s/veh) es una porción de retraso por control que asume llegadas uniformes, flujo estable, y sin cola inicial. El componente de retraso uniforme es el mismo utilizado en el primer término de modelo de retraso uniforme de Webster y está dada por:

$$d_1 = \frac{0.5C * \left(1 - \frac{g}{C}\right)^2}{1 - \left(\min(1, X) * \frac{g}{C}\right)} \tag{3.13}$$

Donde,

C = Duración del ciclo (s); la duración del ciclo se utiliza en el control de la señal de pre-programada, o la longitud de ciclo promedio para el control accionado,



g = Tiempo eficaz en verde para el grupo de carriles (s), el tiempo en verde usado en el control de la señal pre-programada, o grupo de carriles de tiempo eficaz promedio en verde para el control de accionamiento, y

$X = v/c$ Tasa o grado de saturación para el grupo de carril

Grado de Saturación (X). El grado de saturación, también llamada la relación de tasa de flujo de capacidad (v/c) es la relación de volumen a la capacidad; representa la cantidad de demanda que está experimentando la intersección comparada con su capacidad total. Un valor de X igual a 1,0 se da cuando la tasa de flujo es igual a la capacidad y un valor de X igual a cero se da cuando la tasa de flujo es cero. Valores superiores a 1,0 indican un exceso de demanda sobre la capacidad.

El grado de saturación de un determinado grupo de carril i , se calcula como sigue:

$$X_i = \left(\frac{v}{c}\right)_i = \frac{v_i}{s_i \left(\frac{g_i}{C}\right)} = \frac{v_i * C}{s_i * g_i} \quad (3.14)$$

Donde

v_i = Tasa de flujo de la demanda real o proyectada para el grupo de carriles i (veh/h),

s_i = Tasa de flujo de saturación para el grupo de carriles i (veh/h),

g_i = Tiempo eficaz en verde para el grupo de carriles i (s), y

C = Longitud del ciclo (s)

c = Capacidad del grupo del carril (veh/h)

Demora Incremental (d_2). La demora incremental es una parte de la demora por control que representa el retraso debido a las llegadas no uniformes, fallos de ciclo temporal (retraso aleatorio) y demora causados por períodos sostenidos de sobresaturación (demora sobresaturada). La ecuación asume que no hay cola inicial al comienzo del período T .

La demora incremental se calcula como sigue:

$$d_2 = 900T * \left[(X - 1) + \sqrt{(X - 1)^2 + \frac{8kIX}{cT}} \right] \quad (3.15)$$



Donde

d_2 = Demora incremental para explicar el efecto de colas aleatorias y sobresaturadas, ajustado por la duración del período de análisis y el tipo de control de la señal (s/veh)

T = Duración del período de análisis (h);

k = Factor de retraso incremental que depende de la configuración del controlador;

I = Factor de filtrado de ajuste/medición ascendente;

c = Capacidad del grupo de carril (veh/h); y

X = Tasa del grupo de carril v/c o grado de saturación.

Factor de demora incremental (k). El factor de demora incremental se utiliza para incorporar el efecto del tipo de controlador en demora. Cuando se utilizan señales pre-programadas, se utiliza un valor k de 0,50; esto se basa en un proceso de gestión de colas con llegadas aleatorias y tiempo de servicio uniforme equivalente a la capacidad del grupo de carril. Sin embargo, cuando se utilizan controladores accionados, el tiempo en verde se establece de acuerdo a la demanda de tráfico; Por lo tanto, se reduce la demora incremental. La reducción de la demora depende en parte de la extensión de la unidad del controlador y la tasa predominante v/c .

Filtrado ascendente (I). El factor de ajuste de demora incremental (I) incorpora los efectos de las llegadas de medición de señales ascendentes. Para intersecciones aisladas un valor de 1,0 se utiliza basada en un número aleatorio de vehículos por ciclo para que la varianza en las llegadas sea igual a la media. Para intersecciones no aisladas el valor es menor que 1,0 porque las señales ascendentes disminuyen la varianza en el número de llegadas por ciclo en el sujeto (descendente) de intersección y por lo tanto; se reduce la cantidad de demora debido a las llegadas aleatorias.

Demora de fila inicial (d_3). La demora de la fila inicial se define como una fila residual de un período de tiempo anterior que causa una cola inicial al comienzo del período de análisis (T), este retraso adicional es una porción de retraso por control y es experimentado por los vehículos que llegan en el período transcurrido desde que el



primero en la cola sale de la intersección. Si no hay cola restante, el valor de d_3 se establece en cero.

La cola inicial se define como Q_b , en vehículos. Q_b corresponde al residual de vehículos al inicio del período en rojo y no tiene en cuenta ningún vehículo en la cola debido a la aleatorización, ni las fluctuaciones ciclo a ciclo de la demanda (cola desbordada debido a las fallas del ciclo) .

Cuando se estima el retraso por control, cinco escenarios emergen y tres de ellos corresponden a escenarios que tienen una cola inicial.

Caso III: se produce cuando la cola inicial Q_b puede ser totalmente servida en un período de tiempo T . La suma de la cola inicial (Q_b) y la demanda total en T (qT) es menor que la capacidad disponible en (cT).

Caso IV: se produce cuando todavía hay demanda insatisfecha al final de T , pero el tamaño de la demanda insatisfecha está disminuyendo. La demanda en T (qT), debe ser menor que la capacidad (cT).

Caso V: ocurre cuando la demanda excede la capacidad en T . Como resultado, la demanda insatisfecha aumentará al final del período T .

Una forma generalizada de d_3 cuando hay una cola inicial al comienzo del período T está dada por:

$$d_3 = \frac{1800Q_b(1 + u)t}{cT} \tag{3.16}$$

Donde,

Q_b = Fila inicial

c = Capacidad del grupo de carril ajustado (veh/h),

T = Duración del período de análisis (h),

cT = Capacidad disponible en T ,

t = Duración de la demanda insatisfecha en T (h), y

u = Parámetro de demora.



3.4. Consumo de combustible

Se crean los modelos de consumo de combustible para describir la forma en que se consume el combustible bajo diferentes diseños de calzadas y condiciones del tráfico.

Las variables que influyen en el consumo de combustible del vehículo se pueden clasificar en seis grandes categorías: relacionados con los viajes, relacionada con el clima, relacionado con el vehículo, relacionado con el camino de ida, relacionada con el tráfico, y relacionada con los factores del conductor (Ahn, Rakha, Trani, & Aerde, 2002). Por lo tanto, es común que los autores intenten incorporar en sus modelos estas variables para estimar el consumo de combustible.

A pesar de que la demora es probablemente la medida más utilizada de efectividad (MOE), el consumo de combustible se ha convertido en una muy importante. Varios estudios han presentado y evaluado una variedad de modelos matemáticos para estimar el consumo de combustible.

Un estudio fue presentado por Bowyer, Akçelik, y Biggs (1985) para dar una guía para el análisis del consumo de combustible que ayuda a determinar el modelo de consumo de combustible para ser utilizado en función de la información y el análisis que se vaya a llevar a cabo. Presentaron una jerarquía con cuatro tipos de modelos de consumo en función del contexto del análisis (micro modelo, modelos micro/meso, modelos meso/macro y modelos macro) y una jerarquía de cuatro niveles de los modelos de consumo de combustible en función de la agregación (un modelo de consumo de combustible instantáneo de energía-relación, un modelo elemental de consumo de combustible de cuatro modos, un modelo de consumo de combustible de velocidad de funcionamiento y un modelo del consumo de combustible de velocidad de desfase promedio).

Por lo tanto, si la intención de un estudio es analizar algunas intersecciones y sus interacciones, los modelos micro y micro/meso pueden ser apropiados, pero si el análisis es para un sistema de transporte más amplio se usan los modelos meso/macro y macro.



Teniendo en cuenta el hecho mencionado anteriormente, es común encontrar en los estudios de literatura quienes utilizaron los modelos de consumo de combustible para evaluar el impacto de las intersecciones señalizadas sobre el consumo de combustible y también para determinar la planeación de semaforización óptima que minimice el consumo de combustible (Kwak *et al.*, 2012; Li *et al.*, 2004; Liao & Machemehl, 1998; Messenger, Richardson, Graefe, & Mufti, 1980; Robertson, Lucas, & Baker, 1980; Stevanovic, Stevanovic, Zhang, & Batterman, 2009).

Algunos de los modelos microscópicos más importantes que se utilizan para evaluar el impacto de las intersecciones señalizadas sobre el consumo de combustible se discuten brevemente a continuación:

Watson (1980) utilizó un modelo para estimar el consumo de combustible en las intersecciones en las que se predijo el consumo de combustible por unidad de distancia usando la velocidad promedio de la siguiente manera:

$$f_x = k_1 + \frac{k_2}{v_s} + k_3 v_s + k_4 PKE \tag{3.17}$$

Donde k_1 , k_2 , k_3 y k_4 son constantes y representan el combustible utilizado en la superación de las pérdidas de resistencia del vehículo, el consumo de combustible en espera, el consumo debido a la fuerza aerodinámica y el consumo de combustible debido al trabajo para acelerar el vehículo por unidad de distancia respectivamente; v_s es la velocidad de desfase promedio interrumpida y PKE es la suma de los cambios positivos de la energía cinética.

Otro modelo fue propuesto por Bayley (1980), en la cual él deriva la siguiente fórmula consumo de combustible instantáneo:

$$f = \frac{dF}{dt} = c_1 + c_2 v + c_3 v^2 + c_4 a \tag{3.18}$$

Donde f es el consumo instantáneo de combustible por unidad, v es la velocidad instantánea, a es la tasa de aceleración instantánea y de c_1 a c_4 son constantes que dependen de las características del vehículo.



Akçelik (1981) presenta un modelo de consumo de combustible elemental derivado de los modelos desarrollados por Watson (1980) y Bayley (1980). El modelo está dado por:

$$F = f_1 x_c + f_2 d_s + f_3 h \tag{3.19}$$

Donde F es el consumo medio de combustible por-vehículo; x_c es la distancia total de la sección; d_s es la demora promedio de parada por vehículo; h es el número promedio de paradas por vehículo; f_1 , f_2 y f_3 son la tasa de consumo de combustible mientras se conduce, en espera y el consumo excesivo de combustible por vehículo al detenerse respectivamente.

Además de los modelos descritos anteriormente, existen numerosos micro modelos de consumo de combustible en la literatura como los modelos propuestos por Akçelik y Biggs (1987), Tong, Hung, y Cheung (2000), Rakha y Ding (2002), Haworth y Symmons (2004), Barth y Boriboonsomsin (2008), entre otros.

3.5. Modelo de Consumo de Combustible de Akçelik

El modelo de consumo de combustible se basa en la asunción de tres cantidades independientes de consumo de combustible correspondientes a espera, conducir y maniobras de aceleración-deceleración.

El modelo elemental propuesto por (Akçelik, 1983), viene dado por:

$$F = F_c + F_s + F_h = \varphi_1 x_c + \varphi_2 d_s + \varphi_3 h \tag{3.20}$$

F = Consumo promedio de combustible por vehículo (ml)

F_c = Consumo de combustible durante la conducción (ml),

F_s = Consumo de combustible en espera (ml), y

F_h = Combustible consumido durante las maniobras de parada-arranque (ml)

Consumo de combustible en modo crucero (F_c). El modo crucero corresponde al primer componente del modelo elemental; se define como la cantidad de combustible utilizado por un vehículo si la distancia desde la línea de parada de una intersección hasta la línea de parada de la siguiente se viajó a la velocidad crucero. Sin embargo,



también se consideran las demoras debidas a la fricción interna de la vía. El consumo de combustible durante la conducción está dado por:

$$F_c = \varphi_1 x_c \tag{3.21}$$

Donde,

φ_1 = Consumo de combustible por unidad de distancia modo crucero (ml / km), y

x_c = Distancia recorrida durante el cruce ininterrumpido por los dispositivos de control de tráfico (km)

Distancia del cruce (x_c). La distancia de cruce se define como la distancia recorrida durante el cruce ininterrumpido por los dispositivos de control de tráfico. Sin embargo, puede ser más conveniente para expresar el consumo de combustible durante el cruce en términos de la distancia total de la sección (x_s) en lugar de la distancia de cruce x_c .

La distancia total de la sección (x_s) se determina por:

$$x_s = x_c + hx_h \tag{3.22}$$

Donde,

x_h = Distancia promedio de desaceleración-aceleración por parada.

Entonces, x_c en términos de x_s está dada por:

$$x_c = x_s - hx_h \tag{3.23}$$

Sustituyendo en el modelo elemental, tenemos:

$$F = \varphi_1 x_s + \varphi_2 d_s + (\varphi_3 - \varphi_1 x_h)h \tag{3.24}$$

Donde,

$$\varphi_1 = f_1 \tag{3.25}$$

$$\varphi_2 = f_2 \tag{3.26}$$

$$(\varphi_3 - \varphi_1 x_h) = f_3 \tag{3.27}$$

Por lo tanto;

$$F = f_1 x_s + f_2 d_s + f_3 h \tag{3.28}$$

Donde,



f_3 = Exceso de la tasa de consumo de combustible por parada, lo que significa el consumo absoluto por parada menos el consumo si la distancia de desaceleración-aceleración se conduce a la velocidad de cruce.

Consumo de combustible en modo espera (F_s). Modo espera corresponde al segundo componente del modelo elemental; se define como la cantidad de combustible utilizado por un vehículo durante el tiempo que permanece en posición de parada debido a un elemento de control del sistema de tránsito tal como una señal de pare o una señal de tráfico. El consumo de combustible en modo espera, se expresa como:

$$F_s = \varphi_2 d_s \tag{3.29}$$

Donde,

φ_2 = Consumo de combustible por unidad de tiempo en espera (ml/s), y

d_s = Tiempo de espera (s).

Tiempo en Espera (d_s). Se define como el retraso promedio al detenerse por vehículo. La mayoría de los modelos de tráfico predicen un retraso medio d , que incluye la relación entre la desaceleración-aceleración y el retardo de parada (tiempo de inactividad o espera).

La relación se expresa como:

$$d = d_s + h d_h \tag{3.30}$$

Donde,

d_h = Demora promedio de desaceleración-aceleración por parada.

En términos de d_s , tenemos:

$$d_s = d - h d_h \tag{3.31}$$

Sustituyendo en la ecuación 3.28:

$$F = f_1 x_s + f_2 d + (f_3 - f_2 d_h) h \tag{3.32}$$

Donde,



$f_3 - f_2 d_h (f'_3)$ = Tasa ajustada de exceso de consumo de combustible por parada que significa la tasa de consumo de combustible en exceso normal menos el consumo de combustible en espera durante el tiempo d_h .

Por lo tanto:

$$F = f_1 x_s + f_2 d + f'_3 h \quad (3.33)$$

Demora de desaceleración-aceleración (d_h). La demora de desaceleración-aceleración se define como el tiempo empleado durante una maniobra de desaceleración-aceleración t_h , menos el tiempo que se tarda en recorrer la distancia de desaceleración-aceleración x_h , a velocidad de cruce v_c :

$$d_h = t_h - 3600 x_h / v_c \quad (3.34)$$

Donde,

t_h = Tiempo de desaceleración-aceleración (s)

d_h = Demora de desaceleración-aceleración (s)

x_h = Distancia de desaceleración-aceleración (km), y

v_c = Velocidad de cruce (km/h)

Tiempo y la distancia de desaceleración-aceleración (t_h/x_h). El tiempo y la distancia de desaceleración-aceleración se puede calcular suponiendo tasas de deceleración y aceleración constante (a_1, a_2):

$$t_h = 2 v_c / a_h \quad (3.35)$$

$$x_h = v_c^2 / (3600 a_h) \quad (3.36)$$

Donde,

a_h = Velocidad promedio de desaceleración-aceleración por parada (media armónica de a_1 y a_2), dada por:

$$a_h = \frac{2}{(1 + a_1) + (1 + a_2)} \quad (3.38)$$

Por lo tanto, la demora de desaceleración-aceleración se puede expresar como:



$$d_h = \frac{v_c}{a_h} \tag{3.39}$$

Combustible consumido durante las maniobras de parada-arranque (F_h). Finalmente, el último componente del modelo elemental corresponde a las maniobras de parar e iniciar; se define como el consumo de combustible asociado con el exceso de maniobras de parada-iniciar causadas por dispositivos de control de tráfico. Esto implica encontrar maniobras equivalentes de aceleración-desaceleración causada por los dispositivos de control de tráfico en términos de sus valores de consumo de combustible en relación con el consumo asociado con una maniobra completa de arranque-parada de la velocidad de cruce.

El combustible consumido durante las maniobras de parada-arranque se expresa como:

$$F_h = \varphi_3 h \tag{3.40}$$

Donde,

φ_3 = Consumo real de combustible por 'parada', es decir, una maniobra de parada y arranque completo que implica una desaceleración de una velocidad inicial (cruce), a velocidad cero y una aceleración de nuevo a una velocidad final (cruce).

h = Número de paradas efectivas

Número promedio de paradas (efectiva) por vehículo (tasa de parada). El número promedio de paradas por vehículo se define como la tasa de parada para un movimiento en señales de tiempo fijo aisladas y se expresa como:

$$h = 0.9 \left(\frac{1-u}{1-y} + \frac{N_0}{qC} \right) \tag{3.41}$$

Donde,

qC = Número promedio de llegadas en vehículos por ciclo

u = Proporción de tiempo en verde (g/C)

y = Tasa de flujo

N_0 = Promedio de la fila desbordada



Constante (0,9) = Factor de reducción para permitir paradas parciales.

El primer término expresa la proporción de vehículos detenidos y el segundo término hace referencia a las múltiples paradas durante factores sobresaturados utilizando la fila promedio desbordada como un parámetro. Los efectos de paradas múltiples empiezan a ser significativas para valores de saturación de más de 0,8.

Número de llegadas promedio en vehículos por ciclo (qC). El número de llegadas promedio en vehículos por ciclo está dado por la multiplicación del flujo en vehículo por segundo (q) por el tiempo de ciclo en segundos (C).

Fila promedio desbordada (N_0). Se define como el número promedio de vehículos que quedan en la cola después del final del período en verde debido a la sobresaturación durante los ciclos de señal. Para varias líneas de vehículo, la cola promedio en desbordamiento es el número total de vehículos en cola en todos los carriles. Este parámetro se calcula como sigue:

$$N_0 = \left\{ \begin{array}{l} \frac{Q * T_f}{4} * \left(z_m + \sqrt{z_m^2 + \frac{12(X - X_0)}{Q * T_f}} \right) \text{ para } X > X_0 \\ 0 \text{ en otro caso} \end{array} \right. \quad (3.42)$$

Donde;

Q = Capacidad en vehículos por hora

T_f =Flujo en el período, el intervalo de tiempo en horas en el que una tasa de flujo de llegada promedio (q) persiste,

$Q * T_f$ = Rendimiento, el número máximo de vehículos que pueden ser liberados durante el intervalo T_f ,

X = Grado de saturación (q/Q)

$$z = X - 1 \quad (3.43)$$

X_0 = Grado de saturación por debajo del cual la cola promedio en desbordamiento de saturación es aproximadamente cero, dada por:



$$X_0 = 0.67 + s * \frac{g}{600} \tag{3.44}$$

Donde,

g = Tiempo efectivo en verde

s = Flujo de saturación

Tasa de flujo (y). La tasa de flujo se define como la relación de la tasa de flujo de llegada con la tasa de flujo de saturación y se expresa como:

$$y = \frac{q}{s} \tag{3.45}$$

Donde,

q = Tasa de flujo de llegada

s = Tasa de flujo de saturación

Número de paradas completas por unidad de tiempo (H) El número de paradas completas por unidad de tiempos está dada por:

$$H = qh \tag{3.46}$$

Donde,

H = Número promedio de paradas por vehículo

q = Tasa de flujo de llegada (veh/s), y

h = Número de paradas efectivas

3.6. Emisiones de gases a la atmósfera

Hoy en día, la preocupación es cada vez mayor sobre el uso de la energía y las emisiones de gases de efecto invernadero. En la última década, ha habido un crecimiento constante de la población con vehículos de motor y de las emisiones de los vehículos. La congestión del tráfico ha sido mencionado como un factor importante en las emisiones del tráfico por carretera y la degradación de la calidad del aire (Oduyemi & Davidson, 1998).



Los contaminantes resultantes del proceso de combustión y de la evaporación del combustible se han convertido en una causa importante de la mala calidad del aire (EPA, 2012). Este problema se observa con frecuencia en las intersecciones de tráfico, cruces y caminos señalizados en las principales ciudades de todo el mundo en el que las emisiones de los hidrocarburos, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, partículas, óxido de azufre y compuestos orgánicos volátiles representan una amenaza para el medio ambiente y para la salud pública.

Esta situación se agrava cuando se producen a menudo las características relacionadas con el tráfico como paradas, aceleración, desaceleración, demoras relacionadas con filas y demoras de señal de tráfico. Estas características del tráfico, junto con las características del vehículo (tipo, tamaño, edad, estado del motor, tipo de motor, estado de los equipos de control de emisiones, mantenimiento de vehículos) y las condiciones del camino pueden aumentar considerablemente las tasas de emisiones.

Estudios de investigadores como Beydoun y Guldman (2006), Owen (2005) y Pandian, Gokhale, y Ghoshal (2009), entre otros, muestran los efectos nocivos de las características del tráfico en las emisiones al aire.

Como las actividades de transporte representaron el 27% de las emisiones de gases de efecto invernadero de Estados Unidos en 2010; estas se consideran una fuente importante de la contaminación y la mala calidad del aire. Por lo tanto, es necesario para este sector aplicar las estrategias de control de tráfico, que no sólo se centran en la mejora del flujo de tráfico, sino también en la reducción de las emisiones del tráfico. Aunque es común encontrar modelos que se centran en la optimización sólo de la demora, ahora el interés en la reducción de emisiones es cada vez mayor. Algunos autores ya han tratado de incorporar los factores de emisión del tráfico en las estrategias de control de tráfico como Hallmark, Fomunung, Guensler, y Bachman (2000).

Modelos de emisiones, tales como los modelos de consumo de combustible, se desarrollan a niveles macroscópicos, microscópicos y mesoscópicos. Se utilizan modelos macroscópicos (modelos de factores de emisión agregados, los modelos de velocidad promedio y algunos modelos de situación del tráfico) para estimar las



emisiones en un área grande y para describir el comportamiento promedio de una flota alrededor de duraciones especificadas. Modelos Microscópicos estiman emisiones en el nivel de la calle, que incorporan el comportamiento de los vehículos individuales en intervalos de tiempo cortos y utilizan la velocidad instantánea y la aceleración para estimar. Y los modelos mesoscópicos caen entre lo macroscópico y microscópico y tratan con el comportamiento agregado de un grupo de vehículos que utilizan simulaciones en pequeños pasos.

Modelos microscópicos están diseñados comúnmente y se utilizan para evaluar el impacto de las estrategias de control de tráfico en el sistema de tráfico debido a que estos modelos capturan el efecto de los cambios en la velocidad y la aceleración del nivel de un vehículo común.

Algunos de los modelos macroscópicos más importantes incluyen: COPERT 4 (Gkatzoflias, Kouridis, Ntziachristos, & Samaras, 2007) que es un modelo de velocidad promedio desarrollado por la Agencia Europea de Medio Ambiente con base en el principio de que el factor de emisión promedio para un determinado contaminante y un determinado tipo de vehículo varía en función de la velocidad promedio del viaje.

MOBILE6 incluye las tasas de emisión y emisiones fuera de ciclo que reflejan las condiciones del tráfico en el mundo real con mayor precisión y pueden tener en cuenta por separado las emisiones de arranque y las emisiones que se ejecutan. Es capaz de estimar las emisiones por tipo de carretera, la hora del día, y otras características (EPA, 2002).

Las estimaciones del modelo MOBILE son una función de la velocidad del vehículo promedio, la tecnología del vehículo, la edad del vehículo, la temperatura ambiente, parámetros de combustible, y el modo de funcionamiento del vehículo (NRC 1995). Ocho contaminantes pueden ser estimados por el modelo MOBILE6: hidrocarburos (HC), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NOx), el dióxido de carbono (CO₂), material particulado (PM), dióxido de azufre (SO₂), amoníaco (NH₃), y seis peligrosos contaminantes del aire (HAP).

MOBILE6 ha sido reemplazado por MOVES como modelo oficial de la EPA para la estimación de las emisiones de los automóviles, camiones y motocicletas, la



emergente tiene la intención de mejorar en las herramientas de modelado anteriores y se puede utilizar para estimar los inventarios y proyecciones nacionales en el nivel del condado MOVES también incluye un nuevo modelo de emisiones de carros y camiones ligeros estándares que afectan el año 2012 y posteriores (EPA, 2010)

EMFAC (CARB, 2002) es también un modelo de velocidad promedio que incluye estándares para los vehículos de baja emisión y normas de la EPA Tier y supone la reducción de emisiones modestas para los programas de inspección y mantenimiento adecuados. Produce factores de emisión separados para el arranque en frío, arranque en caliente, y las condiciones estabilizadas calientes.

La versión actual del modelo EMFAC es EMFAC2011. EMFAC2011 se puede utilizar para estimar los hidrocarburos (*HC*), monóxido de carbono (*CO*), óxidos de nitrógeno (*NO_x*), el dióxido de carbono (*CO₂*), material particulado (*PM*), el consumo de combustible, los óxidos de azufre (*SO_x*), y el plomo (*Pb*) (Environmental Protection Agency, 2013).

SYNCHRO (Hush & Albeck, 2006) predice emisiones de los vehículos por la primera predicción del consumo de combustible, que se calcula en función de los vehículos-kilómetros, demora total en veh-hr/hr, y paradas totales en paradas por hora. Entonces, el consumo de combustible se multiplica por un factor de ajuste (difiere según el tipo de emisiones) para estimar las emisiones de vehículos.

TRANSYT-7F (Hale, 2005) combina un proceso de optimización detallada (incluyendo algoritmo genético, multi-periodo, y la optimización CORSIM directa) con un modelo de simulación macroscópica detallada (incluyendo dispersión del pelotón, spillback cola, y la simulación de control accionado).

Entre los modelos microscópicos más importantes, es posible encontrar: CMEM es un modelo de emisiones modales creado en 2001 por el Programa de Investigación Cooperativo Nacional de Carreteras de los Estados Unidos para estimar las emisiones de vehículos ligeros producidos en función del modo de funcionamiento del vehículo. El modelo se basa en 23 categorías tecnológicas del vehículo e incluye emisores brutos con los sistemas de control de emisiones que funcionan mal.



CMEM calcula las emisiones y el consumo de combustible de los vehículos industriales ligeros (LDV) bajo diferentes modos de funcionamiento de vehículos (por ejemplo, espera, aceleración, etc.). El modelo determina el tubo de escape de HC segundo a segundo, y las emisiones de CO, NOx y CO2 y el consumo de combustible.

$$Tailpipe - Emissions = FR * \left(\frac{g_{emission}}{g_{fuel}} \right) * CPF \quad (3.47)$$

Donde FR es la tasa de uso de combustible, ($g_{emission}/g_{combustible}$) es la emisión de salida del motor en gramos por gramo de combustible consumido y CPF es la tasa de tubo de escape a las emisiones de salida del motor. El modelo de emisiones modales se compone de seis módulos: la demanda de potencia del motor, la velocidad del motor, la relación de aire-combustible, tasas de combustible, emisiones de los motores de salida, y la fracción de pase del catalizador.

El modelo PHEM (Modelo de emisiones de automóviles de turismo y vehículos de servicio pesado) se ha desarrollado en varios proyectos nacionales e internacionales, llamado la cooperación germano-austriaco-suizo en el Manual de Factores de Emisión, y el marco del quinto programa de investigación de la UE ARTEMIS y la iniciativa COST 346 (TUG, 005).

PHEM simula una flota completa de vehículos de servicio pesado, vehículos de pasajeros y vehículos comerciales ligeros. El conjunto de datos incluye el apoyo a los vehículos de gasolina y diesel de EURO 0 a EURO 6. PHEM calcula el consumo de gasolina y emisiones, utilizando trayectorias de velocidad como entrada del modelo.

Para un ciclo de conducción dado, que se define por la velocidad del vehículo y la pendiente de la carretera (cambio de altitud por distancia recorrida horizontal), PHEM calcula la potencia del motor necesaria segundo por segundo de acuerdo con las resistencias de conducción y las pérdidas en el sistema de transmisión. La velocidad real del motor es simulado por el modelo de cambio de marchas de un conductor y por las relaciones de transmisión. El nivel de emisión real se determina mediante interpolación a partir de mapas de emisiones del motor.



VERSIT+ es un modelo estadístico de emisión capaz de calcular el mundo real de *HC*, *CO*, *NO_x*, *NO₂*, *PM10* y emisiones de *CO₂* sobre la base de la velocidad instantánea y la aceleración de un vehículo. Lo mejor es visto como una herramienta de análisis de un gran conjunto de medición de las emisiones de la flota holandesa, lleva a cabo principalmente en el programa de cumplimiento en uso. Se llevaron a cabo más de 20.000 mediciones con los motores calientes y fríos sobre más de 3.200 vehículos diferentes en un período de más de veinte años. Los vehículos fueron seleccionados al azar de los modelos que comúnmente se venden y se solicitaron a sus propietarios, a participar en el programa de pruebas. El estado de mantenimiento promedio de los vehículos corresponde a la situación holandesa.

SIDRA intersección es un modelo micro-analítico que calcula y compara la capacidad, el nivel de servicio y el rendimiento de los tratamientos alternativos que implican intersecciones señalizadas, rotondas, señal de control todo-camino de stop, etc. El modelo estima las consecuencias financieras, de energía y de contaminación del aire del diseño de intersección usando un modelo elemental de cuatro modos con aceleración detallada, desaceleración, marcha en vacío y elementos de cruces. Los gases de efecto invernadero (*CO₂*) y emisiones contaminantes (*CO*, *NO_x*, *HC*) son evaluados con el fin de evaluar los impactos ambientales de la congestión del tráfico.

Y, por último, los modelos mesoscópicos incluyen: El Sistema de Evaluación de Emisiones Móvil para la Evaluación Urbana y Regional (MEASURE) desarrollado por investigadores del Instituto de Tecnología de Georgia. El modelo MEASURE predice operaciones de vehículos modales y genera estimaciones mesoscópicas de *HC*, *CO* y *NO_x* (Bachman, Sarasua, & Guensler, 1996; Bachman, Sarasua, Hallmark, & Guensler, 2000). Este modelo incluye dos módulos principales: el módulo de inicio de las emisiones y el módulo de emisión en carretera. Para el módulo de emisión de inicio, se utilizaron los datos de registro del vehículo para obtener las características de distribución del vehículo en inicio en frío y en caliente. Las estimaciones de las emisiones iniciales se basarán en las características iniciales de distribución y tasas de emisión iniciales. El módulo de emisiones en camino estima las emisiones del vehículo basada en diferentes modos de operación: espera, cruce, aceleración y desaceleración.



Las tasas de emisión se obtuvieron sobre la base de un análisis refinado de regresión basado en árboles de los datos de pruebas de emisiones de vehículos a partir de la EPA y la Junta de Recursos del Aire de California. Las tasas de emisión son una función del contaminante, del año modelo del vehículo, la tecnología de suministro de combustible del vehículo, emisor del vehículo alta o normal, y las variables modales.

CONTRAM (Modelo de Asignación de tráfico continuo) simula el tráfico variable en el tiempo de una manera coherente y realista para producir un patrón de las emisiones específicas de cada lugar. Las emisiones por unidad de longitud de la carretera se predijeron basadas en un modelo con coeficientes definidos por el usuario, lo que permite puntos de contaminación local o detectada o la contaminación total que se calcula utilizando un modelo externo de dispersión y fuentes extrañas. Los contaminantes por defecto incluyen CO , HC , CO_2 , NO_x y partículas.

3.7. Modelo de emisiones

La fórmula utilizada previamente para calcular el consumo de combustible puede ser utilizado para estimar otras estadísticas de interés o medidas secundarias de rendimiento. Por lo tanto, la siguiente forma general de la ecuación fue seleccionada para tener en cuenta el componente de la minimización objetiva relacionado con las emisiones al aire:

$$E = l_1 x_s + l_2 d_s + l_3 h \quad (3.48)$$

Donde,

E = El estadístico de interés, por ejemplo, las emisiones totales,

x_s = Distancia recorrida durante el cruce ininterrumpido,

d_s = Tiempo en espera,

h = Número de paradas efectivas, y

l_1, l_2, l_3 = Factores, tasas promedio de cruce, demora y paradas, respectivamente.



Capítulo 4
**DISEÑO Y EVALUACIÓN DE LA FUNCIÓN COSTO SOCIAL BASADO EN LA
DEMORA, CONSUMO DE COMBUSTIBLE Y EMISIONES DE GASES**





4. DISEÑO Y EVALUACION DE LA FUNCIÓN COSTO SOCIAL BASADA EN LA DEMORA, CONSUMO DE COMBUSTIBLE Y EMISIONES DE GASES

El efecto más importante de la congestión en el tráfico es el costo asociado con el tiempo adicional de viaje, el consumo de combustible y las emisiones de gases. Actualmente para dar solución al problema de la congestión, las soluciones son elegidas utilizando por separado diferentes medidas de desempeño, causando así la exacerbación de otros problemas. Sólo considerando múltiples objetivos, el valor total de un modelo matemático puede ser potenciado.

El objetivo de este capítulo es diseñar una función matemática con el fin de cuantificar el impacto en términos monetario el costo social asociado a la transición entre planes de semaforización tanto para los usuarios como para el medio ambiente. Esta función se convertiría en una alternativa para reducir problemas tales como el tiempo de viajes excesivos, las emisiones contaminantes y el consumo de combustible. También se desarrollara una heurística para definir planes de transición de semaforización de acuerdo con el número de períodos o etapas necesarias para llevar a cabo el cambio entre los planes de semaforización. Por último, mediante un caso de estudio se medirá



el impacto que tiene el número de pasos y/o tiempo de la transición en el ajuste o sincronización de la señales sobre la función de costo diseñada.

4.1. Introducción

Las intersecciones son las áreas diseñadas entre el cruce de dos corredores con el fin de que los vehículos puedan realizar los diferentes movimientos sin generar conflictos y generalmente están sujetos a políticas de control de tráfico, tales como semáforos o señales de pare. Los usuarios de las intersecciones de tráfico están constantemente expuestos a los retrasos, formación de colas y a cambios en la velocidad, todo esto como consecuencia del uso de la señal de tráfico; estos efectos varían durante todo el día dependiendo de los diferentes niveles de congestión.

Los niveles de congestión de tráfico se han incrementado en las zonas urbanas de los durante los últimos, y han empeorado en las regiones sin importar su tamaño (Schrank *et al.*, 2012). En 2011, la demora total para todos los viajeros en las zonas urbanas de los Estados Unidos fue cuatro veces la demora total en 1982. Un efecto más importante de la congestión del tráfico es el costo asociado con el tiempo de viaje adicional, el consumo de combustible, y las emisiones de gases. La cantidad de desperdicio de combustible debido a la congestión fue de 1,9 mil millones de galones, y el costo total de la congestión alcanzó 101 mil millones de dólares en 2011 para Estados Unidos y 110 mil millones de euros para los estados de la Unión Europea.

El transporte es también un importante contribuyente a las emisiones totales de gases de efecto invernadero (GHG). El sector del transporte contribuye con el 29% del total de las emisiones GHG de Estados Unidos, 25 % de las emisiones de Europa y más del 5% de las emisiones del mundo (U.S. Department of Transportation, 2010). Las mayores fuentes de gases de efecto invernadero del transporte en 2010 fueron vehículos de pasajeros (43%), camiones ligeros, incluidos los vehículos utilitarios deportivos, camionetas y minivans (19%), camiones de transporte de mercancías (22%) y los aviones comerciales (6%). El principal impulsor de las emisiones relacionadas con el transporte fue el CO₂ producido por la combustión de combustibles fósiles, que aumentó un 17% entre 1990 y 2010 y dio lugar a un aumento del 19% en las emisiones globales de las actividades de transporte (EPA, 2012).



Estas estadísticas muestran que, a pesar de los esfuerzos realizados hasta el momento, sigue siendo necesario trabajar para resolver o aliviar los problemas relacionados con el transporte. El diseño de políticas de control de tráfico para la circulación de los usuarios en una intersección específica debe ser realizado de una manera que beneficie a todos los modos de transporte, mejorando no sólo las mediciones de flujo de tráfico, sino también logre influir en factores como la reducción de las emisiones de gases y el consumo de combustible.

Por lo tanto, en el diseño de políticas de control de tráfico, es necesario que las señales coordinadas operen de manera óptima en todo momento, incluso durante las fases de transición entre los planes de semaforización (Selekwa *et al.*, 2003). De hecho, las mejoras en la fase de transición podrían llevar a considerables reducciones en los tiempos de demora, las emisiones de gases y el consumo de combustible.

Varios autores como Shelby *et al.* (2006), Yun *et al.* (2008), McShane y Roess (2011), Lee y Williams (2012) han apuntado en sus estudios los efectos potencialmente negativos y duraderos causados por la transición de un plan de semaforización a otro. Sin embargo, existe una brecha en la literatura en cuanto a la aplicación de métodos matemáticos para hacer frente a las transiciones entre los planes de semaforización y la necesidad de aplicar funciones que pueden optimizar simultáneamente múltiples objetivos (Penabaena-Niebles, Cantillo, Cuentas, & Moura, 2014).

Los pocos artículos que entran en la categoría son modelos simples con objetivos de optimización limitados. Por ejemplo, Lieberman y Wicks (1974) han presentado un algoritmo (RAST) diseñado para minimizar la duración de un período de transición, mientras que Chang (1987) ha examinado un procedimiento de transición en el que el parámetro óptimo se calcula para minimizar la suma de los cuadrados de las diferencias entre los desfases actuales y pasados. Abbas *et al.* (2001) han presentado un algoritmo de transición de señal de tráfico *offset* como una optimización aproximada y Selekwa *et al.*, (2003) han propuesto una metodología para optimizar el flujo de tráfico basado en la optimización de un modelo cuadrático dinámico. Lee y Williams (2012) han presentado un modelo matemático no lineal que minimiza la



demora mediante ajustes incrementales y simultáneos en el *offset* y la longitud de ciclo durante la transición.

En resumen, se hace necesario funciones matemáticas más complejas capaces de evaluar de manera más precisa las condiciones existentes durante el período de transición. En consecuencia, en este capítulo se propone una función con múltiple objetivos encaminado a reducir la demora, las emisiones de gases y el consumo de combustible. El objetivo general es reducir al mínimo el costo social que se entiende como el costo para la sociedad: los usuarios y el medio ambiente. La función de costo social será evaluada con diferentes planes de transición con el fin de determinar el impacto del número de pasos o ciclos necesarios para llegar al nuevo plan de tiempos del semáforo. También se analizaron las relaciones entre el número de pasos para llegar a la transición y la demora, el consumo de combustible y las emisiones de gases

4.2. Diseño de la función costo social

El objetivo principal de este capítulo se centra desarrollar una función matemática que minimice el costo social en términos de tres componentes que correspondan a la demora, al consumo de combustible y a las emisiones de gases al aire. Para tal efecto y después de analizar en el capítulo tres los modelos existentes en la literatura se estableció que el modelo de demora utilizado se basara en la ecuación de HCM , por su parte los componentes para el consumo de combustible y las emisiones de gases a la atmosfera se basara en un híbrido entre el modelo desarrollado por Akçelik (1983) y el modelo de emisiones modales propuesto por Frey, Roupail, Unal, y Colyar (2001). Esta función está orientada a cuantificar el impacto monetario como resultado del uso de señales de tráfico en las intersecciones semaforizadas tanto para los usuarios como para el medio ambiente.

Esta función se convertiría en una nueva alternativa para establecer las medidas de desempeño de las señales de tráfico y en un método efectivo para reducir problemas tales como los tiempos de viaje excesivos, las emisiones contaminantes y el consumo de combustible. Hasta la fecha, al proponer soluciones para el problema de congestión, las soluciones presentadas han sido elegidas utilizando objetivos por separado, lo que lleva a la exacerbación de otros problemas. Sólo considerando



múltiples objetivos se puede realzar la relevancia de un modelo matemático en un solo valor. Li et al (2004) han optimizado la señal del semáforo mediante la definición de una función de índice de rendimiento para reducir las demoras, el consumo de combustible y las emisiones a la aire en las intersecciones, pero esta investigación no tiene en cuenta el costo social asociado a estas variables y fue diseñada exclusivamente para determinar tiempos óptimos para los semáforos.

En las secciones subsiguientes se presenta de forma detallada los aspectos conceptuales y metodológicos para el diseño de la función costo social. La primera subsección describe el enfoque conceptual utilizado para el diseño de la función de costo social propuesta, la segunda subsección muestra el desarrollo del componente de costo asociado con la demora. La tercera subsección presente el diseño para el consumo de combustible y las emisiones de gases, y por último se presenta el diseño de la función costo social diseñada.

4.2.1. Enfoque del modelo

En este estudio se propone una función de costo social en términos de demoras, el consumo de combustible y las emisiones al aire. La función de coste social propuesta tiene las siguientes consideraciones básicas.

La función sólo considera los efectos de las señales en la demora, el consumo de combustible y las emisiones de gases por efecto de las intersecciones, lo cual es una supuesto importante porque los retrasos causados por un punto afectan la trayectoria de aceleración y desaceleración del vehículo, el consumo de combustible y las emisiones al aire de una manera específica. La presencia de las señales de tráfico provoca interrupciones en el flujo de tráfico porque los vehículos desaceleran cuando se acercan a la línea de parada y la señal se convierte en rojo. Luego, se detienen hasta que la señal se pone en verde, después de lo cual acelera para cruzar la intersección (Liu, 2008). Este concepto se utiliza suponiendo que no hay cola inicial y no hay demora en la fila en movimiento.

La mayoría de los modelos de tráfico predicen una demora promedio por control d que incluye la relación entre la desaceleración/aceleración y la demora de tiempo detenido. Se expresa a continuación la demora promedio por control como $d = d^i +$



$d^a + d^d$, donde d^i , d^a y d^d son la demora por parada, aceleración y desaceleración respectivamente, y se ilustran en la Figura 14. La demora por parada d^i se define como la demora promedio en espera por vehículo en una intersección señalizada y representa el tiempo que un vehículo se detiene físicamente y espera que una señal se ponga en verde. La demora por desaceleración d^d se define como el tiempo empleado durante una maniobra de desaceleración menos el tiempo que se tarda en recorrer la distancia de desaceleración a velocidad de crucero, que implica una desaceleración a partir de una velocidad inicial de crucero a una velocidad final cero. La demora por aceleración d^a se define como el tiempo empleado durante una maniobra de aceleración menos el tiempo que se tarda en recorrer la distancia de aceleración a velocidad de crucero, que implica una aceleración de una velocidad inicial de cero a una velocidad de crucero final.

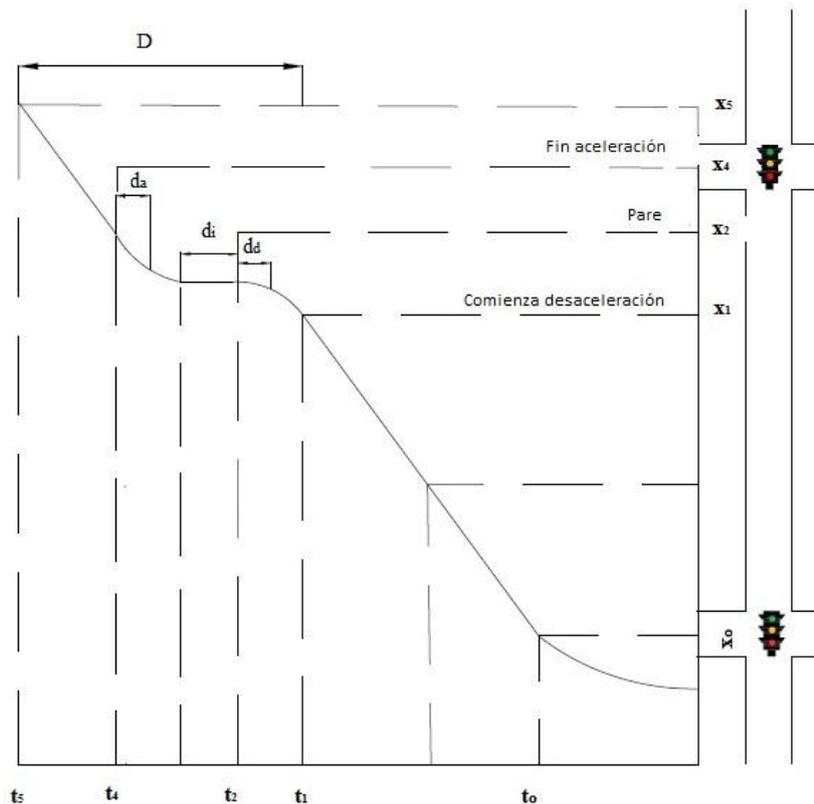


Figura 14. Diagrama que ilustra el comportamiento del espacio-tiempo en una intersección señalizada.

La estimación de la demora de desaceleración-aceleración se define de acuerdo con el modelo propuesto por Akçelik y Besley (2001). Estos tiempos son esenciales para el análisis de consumo de combustible y las emisiones contaminantes.



La demora de aceleración se expresa como sigue:

$$d^a = \frac{(V_f - V_i)}{a_a} \tag{4.1}$$

Donde d^a es la demora de aceleración (s), V_f es la velocidad final (km/h), V_i es la velocidad inicial (km/h) y a_a es la tasa de aceleración promedio (f/ s2).

La tasa promedio de aceleración se calcula para los vehículos ligeros y pesados de la siguiente manera:

$$a_a = f_{aLV}[p_1 + p_2(V_f - V_i)^{0.5} - p_3V_i] \tag{4.2}$$

$$a_a = f_{aHV}[p_1 + p_2PWR(V_f - V_i)^{0.5} + PWR^{0.5}(p_4 - p_3V_i) - (p_5V_f^{0.5} + p_6Gr)/PWR] \tag{4.3}$$

Dónde f_{aLV} y f_{aHV} son los factores de ajuste para las tasas de aceleración de los vehículos ligeros y pesados en las intersecciones, respectivamente, $p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6$ son los parámetros del modelo para predecir las tasas de aceleración, PWR es la relación potencia-peso (fijado en un valor predeterminado de 11.8), y Gr es el grado de aproximación (en porcentaje).

La demora de desaceleración se expresa como sigue:

$$d_d = \frac{(V_i - V_f)}{a_d} \tag{4.4}$$

Dónde d_d es la demora de desaceleración (s) y a_d es la tasa de deceleración media (f/s2).

La tasa de desaceleración promedio se calcula para los vehículos ligeros y pesados de la siguiente manera:

$$a_d = f_{dLV}[p_1 + p_2(V_f - V_i)^{0.5} - p_3V_i] \tag{4.5}$$

$$a_d = f_{dHV} \left[p_1 + p_2PWR(V_f - V_i)^{0.5} + PWR^{0.5}(p_4 - p_3V_i) - \frac{p_5V_f^{0.5} + p_6Gr}{PWR} \right] \tag{4.6}$$

Donde f_{dLV} y f_{dHV} son factores de ajuste para las tasas de desaceleración de vehículos ligeros y pesados en las intersecciones, respectivamente.



4.2.2. Modelado para la demora

Para este estudio, la demora se modela utilizando el *Manual Highway Capacity* (HCM) 2010 (National Research Council . Transportation Research, 2010), el cual es uno de los modelos más utilizados para medir la demora en las intersecciones señalizadas, y se define como parte de la función de costo social para estimar la demora promedio por control por vehículo en cada intersección en un corredor o arteria, suponiendo que no hay cola inicial. Este modelo se expresa en términos de la duración del ciclo y el tiempo en verde, flujo de tráfico y factor de progresión, y viene dada por:

$$d_{ijmv} = \sum_j^n \sum_i^I \sum_m^M \left[\frac{0.5 C_{ij} \left(1 - \frac{g_{ijm}}{C_{ij}}\right)^2}{1 - \left(\min(1, X_{ijm}) - \frac{g_{ijm}}{C_{ij}}\right)} + 900 T_f \left[(X_{ijm} - 1) + \sqrt{(X_{ijm} - 1)^2 + \frac{8 \cdot k \cdot I \cdot X_{ijm}}{Q_{ijm} T_f}} \right] \right] \quad (4.7)$$

donde i es la intersección, j es el paso de transición, m son los movimientos por los carriles o grupos de carriles, v es el tipo de vehículo, C_{ij} es la longitud del ciclo (s) en una intersección i en el paso de transición j , g_{ijm} es el tiempo efectivo en verde (s) de la intersección i en la etapa de transición j para el movimiento m , $X_{ijm} = v/c$ proporción o grado de saturación de la intersección i al paso de transición j para el movimiento m , PF_{ijm} es el factor de ajuste por progresión de la intersección i al paso de transición j para el movimiento m , T_f es la duración del período de análisis (h), k es el factor de incremento de la demora que depende de la configuración del controlador, I es el factor de ajuste ascendente de filtrado/medición, y Q_{ijm} es la capacidad (veh/h) de la intersección i al paso de transición j para el movimiento m .

Con el fin de determinar las demora, en la ecuación (7) el efecto de la calidad en la progresión en el movimiento coordinado se consideró mediante el cálculo de un PF_{ijm} siguiendo la metodología definida por Lee (2009). Con base en esto, el porcentajes de vehículos que llegan cuando la señal esta en verde se calcula a partir de la suposición de que los vehículos liberados desde el semáforo llegan a la siguiente señal en flujo libre sin dispersión del pelotón.



4.2.3. Modelado del Consumo de combustible y emisiones de gases a la atmósfera

Los componentes del consumo de combustible y gas incluidos en esta investigación se calculan de acuerdo a los modelos propuestos por Akçelik (1983) y Frey et al.,(2001). Para evaluar el impacto de las intersecciones señalizadas sobre el consumo de combustible y las emisiones al aire, los dos componentes se basan en la suposición de tres cantidades independientes correspondientes a tres modos de conducción: en espera, aceleración y desaceleración.

La ventaja de este modelo es su simplicidad, generalidad y la claridad conceptual, junto con su relación directa con las técnicas de modelado de tráfico existentes (Ahn *et al.*, 2002). El modelo se considera el más adecuado para predecir tanto el consumo de combustible y las emisiones de gases de los vehículos en arterias señalizadas porque modela con precisión el número de aceleraciones y la duración del tiempo en espera (A. Unal, 2003; Frey *et al.*, 2001). Estos factores son importantes porque los tiempos de espera debido a las paradas y maniobras de aceleración-desaceleración son las principales causas de las altas tasas de consumo de combustible y las emisiones de gases en intersecciones semaforizadas.

El modelo de consumo de combustible propuesto viene dado por:

$$FC_{ijmv} = \sum_j^n \sum_i^I \sum_m^M \sum_v^V [F_{ijmv}^i + F_{ijmv}^a + F_{ijmv}^d] \quad (4.8)$$

Donde, *i* es la intersección, *j* es el paso de transición, *m* es el movimiento para el carril o grupos de carriles, *v* es el tipo de vehículo, FC_{ijmv} es el promedio de consumo de gasolina por vehículo (ml) en la intersección señalizada *i* al paso de transición *j* para el movimiento *m*, por tipo de vehículo *v*, F_{ijmv}^i es el consumo de gasolina mientras el vehículo está en espera (ml) en la intersección señalizada *i* al paso de transición *j* para el movimiento *m* por tipo de vehículo *v*, y F_{ijmv}^a y F_{ijmv}^d son el consumo de gasolina (ml) durante el modo de aceleración y desaceleración respectivamente, en la intersección señalizada *i* al paso de transición *j* para el movimiento *m* en el tipo de vehículo *v*.



El consumo de combustible durante la espera ($F_{ijmv_s}^i$) se define como la cantidad de combustible utilizado por un vehículo mientras se mantiene en una posición de parada debido a una señal de tráfico. Esta cantidad se expresa como:

$$F_{ijmv}^i = \sum_j^n \sum_i^I p_s \sum_m^M \sum_v^V [q_{ijmv} \tau_v^i d_{ijmv}^i] \quad (4.9)$$

Dónde p_s es la proporción de vehículos detenidos en la intersección i , τ_v^i es el consumo de combustible por unidad de tiempo en espera (ml/s) según el tipo de vehículo v , d_{ijmv}^i es el tiempo en espera (s) en una intersección señalizada i por el paso de transición j para el movimiento m por tipo de vehículo v y q_{ijmv} es la demanda total del flujo de tráfico (veh/h) en una intersección señalizada i para el paso de transición j para el movimiento m por tipo de vehículo v .

Al cuantificar el combustible consumido durante las maniobras de aceleración y desaceleración (F_{ijmv}^a and F_{ijmv}^d) se define como el exceso de consumo de combustible asociado a maniobras de la velocidad de cruce causada por los dispositivos de control de tráfico de parada y arranque (es decir, la desaceleración y aceleración)

El combustible consumido durante las maniobras de aceleración y desaceleración se expresa como:

$$F_{ijmv}^a = \sum_j^n \sum_i^I p_s \sum_m^M \sum_v^V [q_{ijmv} \tau_v^a d_{ijmv}^a] \quad (4.10)$$

$$F_{ijmv}^d = \sum_j^n \sum_i^I p_s \sum_m^M \sum_v^V [q_{ijmv} \tau_v^d d_{ijmv}^d] \quad (4.11)$$

donde p_s es la proporción de vehículos detenidos en la intersección i , τ_v^d y τ_v^a son el consumo de combustible por la desaceleración y la aceleración (ml/s) por tipo de vehículo v , d_{ijmv}^d es la demora de desaceleración (s) en una intersección señalizada i en el paso de transición j para el movimiento m por tipo de vehículo v , d_a es la demora de aceleración (s) en un intersección señalizada i en el paso de transición j para el movimiento m por tipo de vehículo v y q_{ijmv} es la demanda total del flujo de tráfico



(veh/h) en una intersección señalizada i at transition step j for movement m by type of vehicle v .

El consumo promedio de combustible por vehículo (ml) en una intersección señalizada FC viene dada por:

$$FC_{ijmv} = \sum_j^n \sum_i^I p_s \sum_m^M \sum_v^V [q_{ijmv} \tau_v^i d_{ijmv}^i + q_{ijmv} \tau_v^a d_{ijmv}^a + q_{ijmv} \tau_v^d d_{ijmv}^d] \quad (4.12)$$

La fórmula utilizada previamente para calcular el consumo de combustible se puede utilizar para estimar otras estadísticas tales como las emisiones de contaminantes. Por lo tanto, se selecciona la siguiente forma general de la ecuación para tener en cuenta el componente de la función de costo social relacionada con las emisiones al aire:

$$GE_{ijmve} = \sum_j^n \sum_i^I p_s \sum_e^E \sum_m^M \sum_v^V q_{ijmv} [\psi_{ve}^i d_{ijmv}^i + \psi_{ve}^a d_{ijmv}^a + \psi_{ve}^d d_{ijmv}^d] \quad (4.13)$$

Donde, ψ_{ve}^i , ψ_{ve}^d y ψ_{ve}^a son las emisiones de gases tipo e para la espera, la desaceleración y aceleración (ml/s) respectivamente por tipo de vehículo.

4.2.4. Función matemática para cuantificar el costo social

La función de coste social propuesta se define como los costos asociados con el usuario o el automovilista más el costo ambiental. Los costos del usuario tienen una relación directa con la demora promedio por vehículo y el consumo de combustible, incluyendo el costo de tiempo para las personas en los vehículos y los costos de operación vehicular. El costo se calcula utilizando el tiempo de ocupación del vehículo, el ingreso promedio (definido como de tiempo completo para adultos promedio de los ingresos totales por hora) y un factor de valor de tiempo que convierte el ingreso promedio de un valor de tiempo (Akçelik & Besley, 2003). Los costos de operación de vehículos incluyen combustible, neumáticos, aceite, y los costos de reparación y mantenimiento. Los costos de los usuarios tienen una relación directa con el retraso medio por vehículo, y los costos ambientales son un precio sombra o contribución monetaria de las emisiones de gases de efecto invernadero.



La función de costo social está diseñada para evaluar el impacto del cambio de planes de distribución en los retrasos, los consumos de combustible y los costos de emisión. Las mediciones de demora, el consumo de combustible y emisiones de gases de efecto invernadero correspondientes a las intersecciones se tienen en cuenta para minimizar el impacto negativo del ajuste de los parámetros de coordinación de la señal durante las transiciones.

La función de costo social **SC** es, por tanto:

$$SC = VT \sum_j^n \sum_i^I \sum_m^M \sum_v^V [OR_v d_{ijmv} q_{ijmv}] + \sum_j^n \sum_i^I \sum_m^M \sum_v^V [OC_v \cdot FC_{ijmv}] + ECG \sum_j^n \sum_i^I \sum_e^E GWP_e \sum_m^M \sum_v^V [GE_{ijmve}] \quad (4.14)$$

Donde, VT es el valor del tiempo, OR_v es la tasa de ocupación por tipo de vehículo v, OC_v es el costo de operación por tipo de vehículo v, ECG es el costo ambiental de la emisión de gases en función del dióxido de carbono contaminante y GWP_e es el potencial de calentamiento global de la emisión de gas tipo e, este último es la medida relativa de la cantidad de calor de gases de efecto invernadero en la atmósfera, donde el potencial de calentamiento del dióxido de carbono es de 1.

La función de coste social propuesta tiene como objetivo generar una amplia gama de beneficios directos e indirectos. Está pensado principalmente para minimizar el costo relacionado con las demoras, el combustible y las emisiones de gases. Los beneficios indirectos incluyen la reducción de varios efectos negativos, como una enfermedad humana, la discapacidad y la muerte, y varios tipos de daños ecológicos, tales como la contaminación acústica, lo que provoca la distracción y el estrés y por lo tanto reduce el valor de las propiedades a lo largo de las carreteras con tráfico pesado (Litman, 2013).

4.2.5. Diseño de una heurística para determinar planes de transición

Con el fin de evaluar el impacto del número de períodos o ciclos utilizados durante la transición en la función de costo social diseñada, un método heurístico ha sido diseñado para determinar los planes de transición (TSTP) con diferentes números de pasos o períodos (n) para ajustar los tiempos del semáforo. Esta heurística está orientada a mantener la progresión y suavizar los parámetros de coordinación, lo que significa que los ajustes de los parámetros de desfases φ , duración de los ciclos C y



fases verdes g son suaves y simultáneos y se llevan a cabo para reducir los efectos de la interrupción. Los parámetros de entrada para este procedimiento son el número de intersecciones (i), el número de movimientos (m), el plan de semaforización inicial optimizado para la intersección i (STP_{i0}), plan de semaforización final optimizado para la intersección i (STP_{in+1}), y el período de estudio (Tf). Las salidas son los parámetros de coordinación de desfases φ_{ij} , las longitudes de ciclo C_{ij} y la fase verde g_{ijm} en la intersección i del paso o período n .

El procedimiento TSTP es como sigue:

Paso 0 Inicio $i = \{1,2 \dots I\}$; $m = \{1,2 \dots M\}$; $STP_{i0} = \{C_{i0}, \varphi_{i0}, g_{i01}, g_{i02} \dots \dots g_{i0m}\}$;
 $STP_{in+1} = \{C_{in+1}, \varphi_{in+1}, g_{in+1,1}, g_{in+1,2} \dots \dots g_{in+1,m}\}$; Tf ; $\Delta\varphi_{i0} = 0$; $\Delta C_{i0} = 0$;
 $\{\Delta g_{i0m}, \Delta g_{i0m} \dots \Delta g_{i0m}\} = 0$.

Paso 1 Definir el número de pasos o períodos (n) de adaptación de los planes de semaforización; $n \in \{1,2 \dots N\}$ donde $N = Tf/\min\{C_{in+1}, C_{i0}\}$

Paso 2 Definir el cambio de desfase $\Delta\varphi_{ij}$ y desfase φ_{ij}

Para $j = 1$ to n

Para $i = 1$ to I

$$\Delta\varphi_{ij} = \text{trunc}[(\varphi_{in+1} - \varphi_{i0} - \sum_{k=1}^j \Delta\varphi_{ik-1})/(n - j + 1)]$$

$$\varphi_{ij} = \varphi_{ij-1} + \Delta\varphi_{ij}$$

Fin

Fin

Paso 3 Definir el cambio de la longitud de ciclo ΔC_{ij} y longitud de ciclo C_{ij}

Para $j = 1$ to n

Para $i = 1$ to I

$$\Delta C_{ij} = \text{trunc}[(C_{in+1} - C_{i0} - \sum_{k=1}^j \Delta C_{ik-1})/(n - j + 1)]$$

$$C_{ij} = C_{ij-1} + \Delta C_{ij}$$

Fin



Fin

Paso 4 Definir el cambio de fase verde Δg_{ijm} y la fase verde g_{ijm}

Para $j = 1$ to n

Para $i = 1$ to I

$$\Delta g_{ijm} = \text{trunc}[(g_{i(n+1)m} - g_{i0m} - \sum_{k=1}^j \Delta g_{i(k-1)m}) / (n - j + 1)]$$

$$g_{ijm} = g_{i(j-1)m} + \Delta g_{ijm}$$

Fin

Fin

Este procedimiento se puede utilizar para generar diferentes planes de semaforización de acuerdo con el número deseado de pasos o períodos requeridos para lograr una transición entre los planes de semaforización.

4.3. Evaluación del impacto de los tiempos de la transición el costo social

Para evaluar el impacto del número de períodos utilizados durante la transición en la función de costo social diseñada, un ejemplo hipotético que consta de una arteria con tres intersección tomado de Lee y Williams (2012) se utiliza para aplicar la función de costo social propuesta y evaluar cómo afecta el número de pasos necesarios para ajustar el plan de semaforización en el modelo de costos propuesto.

En este caso, cada aproximación de la intersección tiene un solo carril exclusivo para giros a la izquierda y el número de carriles completos en la calle principal es de 3 y en las calles secundarias es de 1, respectivamente, como se muestra en la Fig. 15. Las tasas de flujo para cada intersección se establecen en 20%, 70% y 10% para giros a la izquierda, a través de la intersección y giro a la derecha, respectivamente.

El volumen de entrada para la arteria coordinada tiene una tasa de cambio de 50:50 a 55:45 durante el período de transición. Al mismo tiempo, la tasa de volumen capacidad (v/c) aumenta desde 0.5 hasta 0.8 para la transición en un periodo pico. Los tiempos optimizados para las señales de tráfico antes y después de la transición se



observan en la Tabla 6 y Tabla 7 respectivamente. La flota está compuesta por 98% de vehículos ligeros y 2% de vehículos pesados.

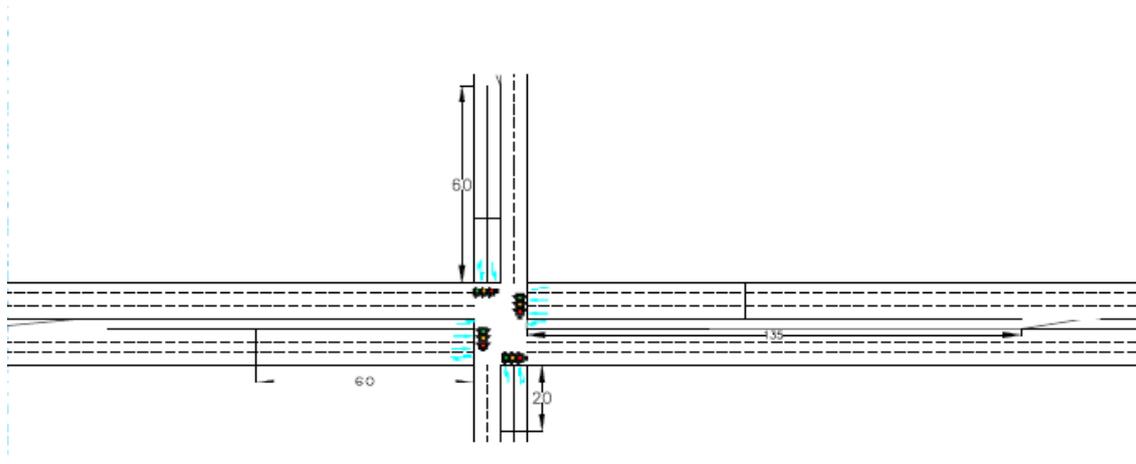


Figura 15. Esquema de las intersecciones señalizadas

| Antes de la Transición | | | | | | | |
|------------------------|------------|-----------------|--------------------|-----------------|--------------------|-----------------|--------------------|
| Intersección | | 1 | | 2 | | 3 | |
| Fase | Movimiento | Tiempo de Verde | Tasa de flujo(v/h) | Tiempo de Verde | Tasa de flujo(v/h) | Tiempo de Verde | Tasa de flujo(v/h) |
| 1 | WBL | 11 | 211 | 10 | 171 | 11 | 141 |
| 2 | EBT | 17 | 564 | 17 | 681 | 17 | 843 |
| 3 | NBL | 5 | 75 | 5 | 73 | 5 | 75 |
| 4 | SBT | 16 | 302 | 17 | 292 | 16 | 302 |
| 5 | EBL | 11 | 141 | 10 | 171 | 11 | 211 |
| 6 | WBT | 17 | 843 | 17 | 681 | 17 | 564 |
| 7 | SBL | 5 | 75 | 5 | 73 | 5 | 75 |
| 8 | NBT | 16 | 302 | 17 | 292 | 16 | 302 |
| Tamaño de Ciclo | | 65 | | 65 | | 65 | |
| Desfase | | 24 | | 0 | | 24 | |

Tabla 6. Datos de tiempos óptimos de la arteria antes de la transición

| Después de la Transición | | | | | | | |
|--------------------------|------------|-----------------|--------------------|-----------------|--------------------|-----------------|--------------------|
| Intersección | | 1 | | 2 | | 3 | |
| Fase | Movimiento | Tiempo de Verde | Tasa de flujo(v/h) | Tiempo de Verde | Tasa de flujo(v/h) | Tiempo de Verde | Tasa de flujo(v/h) |
| 1 | WBL | 17 | 377 | 16 | 300 | 16 | 245 |
| 2 | EBT | 27 | 855 | 24 | 1011 | 25 | 1233 |
| 3 | NBL | 5 | 114 | 6 | 107 | 6 | 108 |
| 4 | SBT | 24 | 557 | 27 | 522 | 26 | 523 |
| 5 | EBL | 17 | 214 | 16 | 252 | 16 | 309 |
| 6 | WBT | 27 | 1506 | 24 | 1201 | 25 | 980 |
| 7 | SBL | 5 | 139 | 6 | 130 | 6 | 130 |
| 8 | NBT | 24 | 456 | 27 | 426 | 26 | 523 |
| Tamaño de Ciclo | | 90 | | 90 | | 90 | |
| Desfase | | 48 | | 0 | | 48 | |

Tabla 7. Datos de tiempos óptimos de la arteria después de la transición



Los parámetros para la función de costo social son como sigue. El costo de tiempo por persona (VT) es 9,432 dólares/hora para vehículos ligeros y pesados y se calcula usando un ingreso promedio por hora de 23,58 dólares/h ("Bureau of labor statistics," 2012) y un factor de valor de tiempo como proporción del ingreso promedio por hora de 40%. El costo de operación por vehículo por galón de combustible es de 7,25 dólares/galón, calculado utilizando una unidad de costo por galón de 3,45 dólares/gal ("Energy Information Administration," 2012), el factor de costo de recursos de combustible es de 70% y la relación costo/combustible es de 3. Los costos sociales marginales de las emisiones de gases de efecto invernadero para el dióxido de carbono (CO₂) es de 25 dólares/tC, que se toma a partir de un estudio realizado por Fankhauser (1994) en la que el valor de efecto invernadero CO₂ se estima para cuatro décadas 1991-2030.

El peso promedio del monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC), y óxido de nitrógeno (NOx) para cada modo de conducción se calculan a partir de los resultados experimentales de Tong *et al.* (2000) y de Wing-Tat, Hing-Yan, y Chun-Shun (2005), de igual forma el potencial de calentamiento global (GWP) para el CO, HC y NOx se calculará de acuerdo con Shine (2001). Estos valores y las tasas de ocupación para cada tipo de vehículo se muestran en la Tabla 8.

| | Vehículos ligeros | | | Vehículos pesados | | |
|-----------------------------|-------------------|----------------|--------|-------------------|----------------|--------|
| | Aceleración | Desaceleración | Espera | Aceleración | Desaceleración | Espera |
| Combustible (mg/seg) | 62,62 | 28,11 | 18,11 | 133,1 | 117,1 | 25,9 |
| CO (mg/seg) | 9,54 | 9,96 | 2,99 | 12,63 | 10,92 | 7,5 |
| GPW_{CO} | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| HC (mg/seg) | 0,69 | 0,58 | 0,36 | 2,36 | 1,96 | 1,15 |
| GPW_{HC} | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 |
| Nox (mg/seg) | 0,62 | 0,69 | 0,14 | 13,94 | 11,65 | 4,04 |
| GPW_{NOx} | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 |
| Taza de Ocupación | | 1,3 | | | 1,2 | |

Tabla 8. Tasas y consumo de combustible y emisiones de gases de acuerdo con el modo de conducción y tipo de vehículo

El procedimiento TSTP descrito en la sección anterior se aplica a un número diferente de pasos o periodos (n) para ajustar señal de semaforización con $n \in \{1,2 \dots N\}$, donde $N = 900/\min\{65,90\}$. Se obtienen catorce planes de transición de



semaforización usando el TSTP, y cada uno se evalúa en la función del costo social. Lo anterior se realiza mediante un código de programación realizado en Matlab, el cual mediante la heurística diseñada obtiene los diferentes planes de transición y los evalúa en la función costo social (Anexo 2). La Tabla 9 muestra la transición de los planes de semaforización para seis (6) períodos o etapas de transición siguiendo el procedimiento TSTP.

Se evalúa el plan de transición de semaforización para seis períodos utilizando las ecuaciones (1) - (14), y el costo social total de este plan de transición es 981,07 dólares, 835,60 dólares para los costos de tiempo, 128,87 dólares por costo de operación por vehículo, 16,6 dólares por el costo de CO, HC, y las emisiones de NOx. La demora promedio por control por vehículo cuando se produce la transición en seis pasos es 27,72 segundos/vehículo.

| Numero de Períodos o Pasos | Intersección | Tiempo de Verde por Movimiento | | | | | | | | Tamaño del Ciclo | Desfase |
|----------------------------|--------------|--------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------------------|---------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | | |
| | | WBL | EBT | NBL | SBT | EBL | WBT | SBL | NBT | | |
| Antes | 1 | 11 | 17 | 5 | 16 | 11 | 17 | 5 | 16 | 65 | 24 |
| | 2 | 10 | 17 | 5 | 17 | 10 | 17 | 5 | 17 | 65 | 0 |
| | 3 | 11 | 17 | 5 | 16 | 11 | 17 | 5 | 16 | 65 | 24 |
| 1 | 1 | 12 | 18 | 5 | 17 | 12 | 18 | 5 | 17 | 73 | 28 |
| | 2 | 11 | 18 | 5 | 18 | 11 | 18 | 5 | 18 | 69 | 0 |
| | 3 | 11 | 18 | 5 | 17 | 11 | 18 | 5 | 17 | 73 | 28 |
| 2 | 1 | 13 | 19 | 5 | 18 | 13 | 19 | 5 | 18 | 77 | 32 |
| | 2 | 12 | 19 | 5 | 19 | 12 | 19 | 5 | 19 | 73 | 0 |
| | 3 | 12 | 19 | 5 | 18 | 12 | 19 | 5 | 18 | 77 | 32 |
| 3 | 1 | 14 | 21 | 5 | 19 | 14 | 21 | 5 | 19 | 81 | 36 |
| | 2 | 13 | 20 | 5 | 21 | 13 | 20 | 5 | 21 | 77 | 0 |
| | 3 | 13 | 20 | 5 | 20 | 13 | 20 | 5 | 20 | 81 | 36 |
| 4 | 1 | 15 | 23 | 5 | 20 | 15 | 23 | 5 | 20 | 85 | 40 |
| | 2 | 14 | 21 | 5 | 23 | 14 | 21 | 5 | 23 | 81 | 0 |
| | 3 | 14 | 21 | 5 | 22 | 14 | 21 | 5 | 22 | 85 | 40 |
| 5 | 1 | 16 | 25 | 5 | 22 | 16 | 25 | 5 | 22 | 89 | 44 |
| | 2 | 15 | 22 | 6 | 25 | 15 | 22 | 6 | 25 | 85 | 0 |
| | 3 | 15 | 23 | 6 | 24 | 15 | 23 | 6 | 24 | 89 | 44 |
| 6 | 1 | 17 | 27 | 5 | 24 | 17 | 27 | 5 | 24 | 89 | 48 |
| | 2 | 16 | 24 | 6 | 27 | 16 | 24 | 6 | 27 | 85 | 0 |
| | 3 | 16 | 25 | 6 | 26 | 16 | 25 | 6 | 26 | 89 | 48 |
| Después | 1 | 17 | 27 | 5 | 24 | 17 | 27 | 5 | 24 | 90 | 48 |
| | 2 | 16 | 24 | 6 | 27 | 16 | 24 | 6 | 27 | 90 | 0 |
| | 3 | 16 | 25 | 6 | 26 | 16 | 25 | 6 | 26 | 90 | 48 |

Tabla 9. Plan de transición para 6 períodos o etapas de transición.

4.4. Discusión y análisis caso de estudio

Para evaluar el impacto de la transición entre los planes de semaforización en la función de costo social propuesta, el número de pasos necesarios para ajustar la señal



de semaforización se define como una variable de control. Por lo tanto, los datos de la arteria antes y después de la transición mostrados en las Tablas 6 y 7 respectivamente se evalúan utilizando el procedimiento TSTP, descrito en la sección 4.3, para obtener 14 planes de transición, uno para cada número de pasos n , y cada plan de semaforización se evalúa en la función de costo social para identificar los planes de transición apropiados.

Se obtienen los costos de la demora, el consumo de combustible, las emisiones al aire y el coste social total como una función del número de pasos n y se muestran en las Figuras 16-20. Estos valores se obtienen bajo el supuesto de que el flujo de tráfico tiene un patrón que aumenta linealmente durante el período de transición.

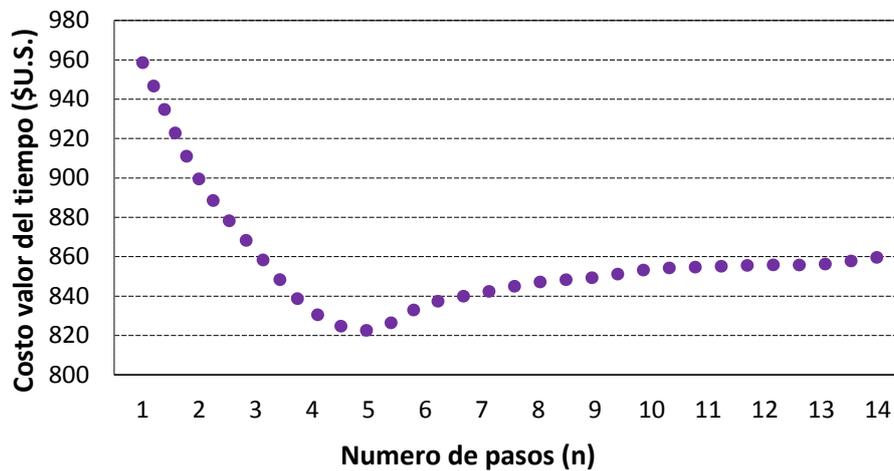


Figura 16. Costo del tiempo de acuerdo con el número de pasos n

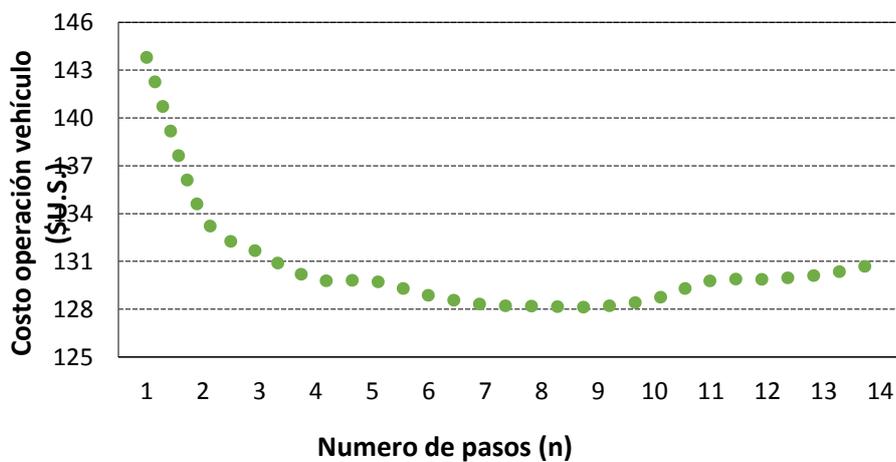


Figura 17. Costo de operación del vehículo de acuerdo a los números de pasos n



Como se observa en la Figura 16, para los costos por demora, los máximos valores se obtienen cuando la transición tiene 1, 2 o 3 pasos, y el costo mínimo se produce cuando la transición tiene 5 pasos. Las transiciones que utilizan más de 5 pasos muestran pequeños aumentos en el valor del costo de tiempo. El coste de operación del vehículo en la figura 17 disminuye a medida que los pasos de transición aumentan hasta que se alcanzan 9 pasos. El costo mínimo se produce cuando la transición toma 9 pasos, y las transiciones que requieren más de 10 pasos causan pequeños aumentos en el costo de operación del vehículo. El costo de las emisiones de gases en la Figura 18 muestra un comportamiento similar a los costos de operación vehicular. La Figura 19 muestra que el mejor rendimiento de costo social, o costo mínimo, se obtiene cuando se logra la transición de 4, 5, 6 o 7 períodos. Las transiciones que requieren menos de 4 pasos o más de 7 pasos tienen altos costos sociales.

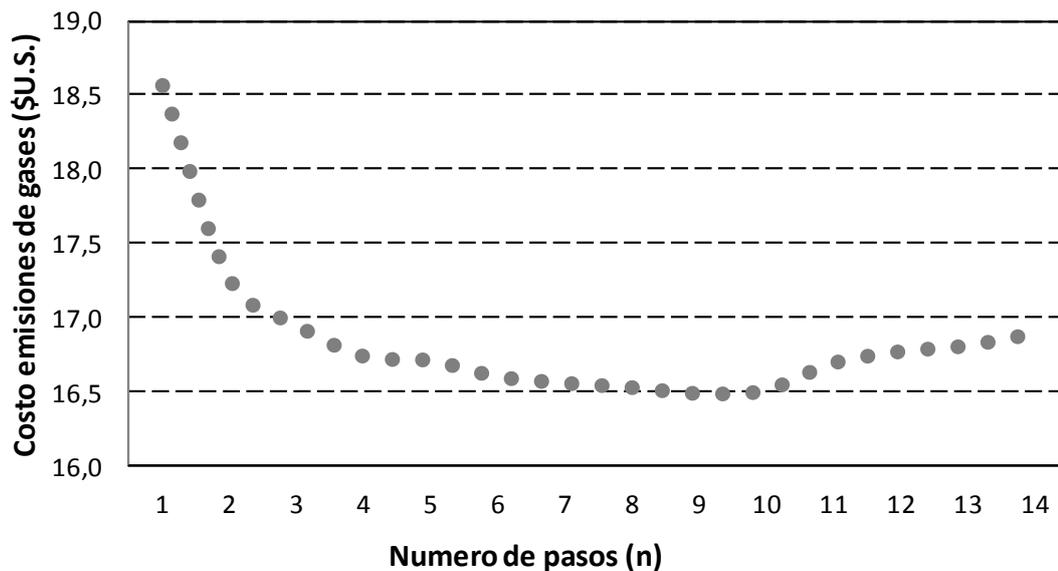


Figura 18. Costo de emisión de gases de acuerdo con el número de pasos n

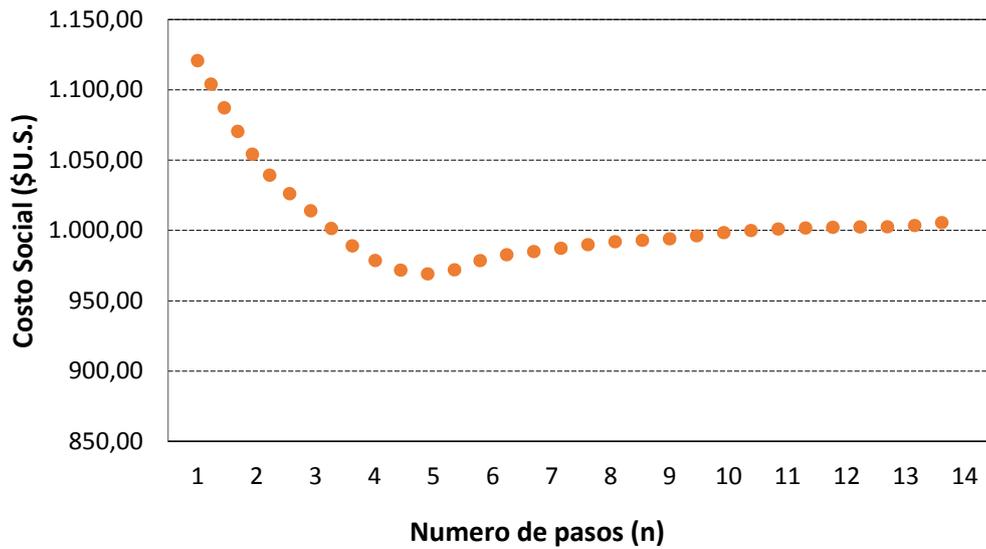


Figura 19. Costo social de acuerdo con el número de pasos n

Por lo general, se puede observar en las Figuras 16-19 que la máxima demora, el consumo de combustible, emisiones de gas y los costos sociales totales se producen cuando las transiciones se realizan muy rápidamente o muy lentamente, es decir, cuando el número de períodos o pasos durante la transición (n) es pequeño o grande.

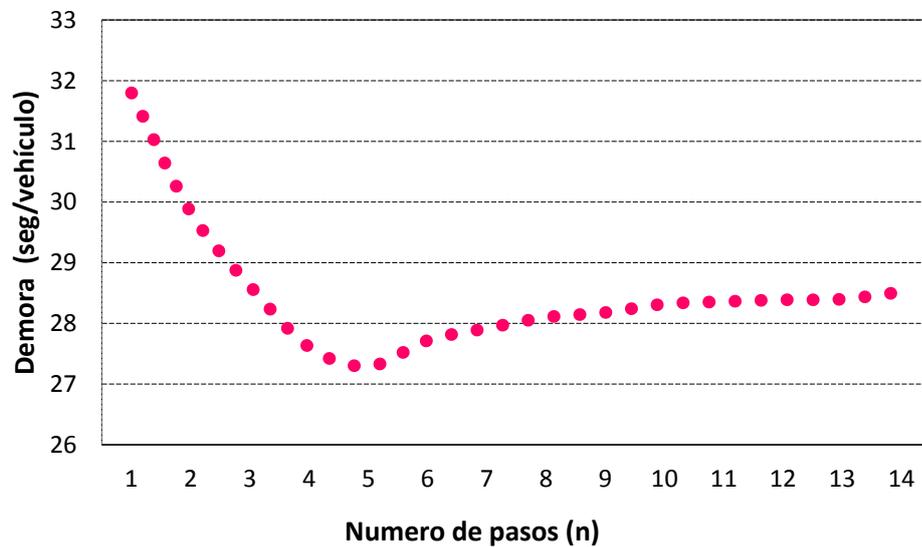


Figura 20. Demora o retraso (segundos) de acuerdo con el número de pasos n

El promedio mínimo de demora por vehículo se produce cuando la transición toma cinco pasos o períodos de transición (27,29 segundos/vehículo), como se muestra en la Figura 20.



De las figuras mostradas arriba, se puede analizar qué planes de transición con 4 o 7 pasos son asociados con rangos satisfactorios de costo social. Los planes que se realizan en 4 o 5 pasos son favorables para los usuarios y cuando la transición es alcanzada en 6 o 7 pasos, la función costo social muestra desempeños positivos para el medio ambiente con pequeños detrimentos en las demoras afectando a los usuarios.





Capítulo 5
**DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE UN MODELO MATEMÁTICO PARA LA
TRANSICIÓN DE PLANES EN LOS TIEMPOS DE LOS SEMÁFOROS**





5. DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE UN MODELO MATEMÁTICO PARA LA TRANSICIÓN DE PLANES EN LOS TIEMPOS DE LOS SEMÁFOROS.

Las políticas y estrategias para mejorar la eficiencia de los sistemas de transporte se han convertido en una herramienta para mejorar la movilidad en las ciudades, y reducir los problemas asociados a la congestión tales como el consumo de combustible, las emisiones de gases de efecto invernadero y la demora. Pero a pesar de los esfuerzos realizados, todavía hay trabajo por hacer con el fin de aliviar este problema y sus implicaciones. La óptima implementación de la transición entre los planes de los tiempos de los semáforos es una estrategia para mejorar el desempeño de los sistemas de señales, pero a pesar su importancia son pocos los estudios que han abordado esta problemática desde un enfoque matemático y haciendo uso de las técnicas actuales de optimización.

El propósito de este capítulo es desarrollar un modelo matemático integral para mejorar el desempeño de la transición entre los planes de semaforización en las intersecciones coordinadas, usando un enfoque multi objetivo, además un algoritmo de optimización de colonia de hormigas se utiliza para encontrar los parámetros óptimos de coordinación y determinar el tiempo necesario para lograr la transición.



Por último, mediante un ejemplo numérico se evalúa la eficacia del nuevo modelo tomando como base su capacidad para reducir al mínimo, los retardos, las emisiones de contaminación del aire y el consumo de combustible.

5.1. Introducción

El rápido aumento de la demanda de tráfico urbano, como resultado del crecimiento demográfico y el desarrollo económico ha provocado un aumento de los efectos de la congestión del tráfico y los costos asociados con el tiempo de viaje adicional, el consumo de combustible y las emisiones de gas.

Las estrategias para mejorar la eficiencia del sistema de transporte se han convertido en una herramienta para aliviar los problemas de tráfico y mejorar la movilidad en las ciudades, además de que puede llevar a una reducción potencial en el consumo de combustible, las emisiones de gases de efecto invernadero y la demora. La mejora de las señales de tráfico es una de las herramientas más importantes para la disminución de la congestión total y sus efectos. Un estudio de la situación de las señales en EE.UU indica que las mejoras básicas en la señal pueden lograr una reducción del 15% al 20% en la demora, mientras que las mejoras avanzadas, pueden reducir la demora hasta en un 40% (Chin *et al.*, 2004).

En ese orden de ideas, las estrategias más relevantes utilizadas para mejorar las señales y el flujo de tráfico en calles arteriales son la coordinación de la señal de tráfico y optimización de planes de semaforización y fases de transición.

Los problemas de movilidad durante la coordinación se producen debido a la fluctuación temporal y espacial de flujo de tráfico. Por ejemplo, durante los periodos de mucho tráfico o las horas pico, la demanda de tráfico excede la capacidad y la congestión es inevitable. En este caso, los sistemas de señales de tráfico deben ser diseñados para aliviar la congestión del tráfico en las redes urbanas. Por lo general, en un día normal hay muchos cambios en los patrones de tráfico en las intersecciones de una red vial urbana. Por lo tanto, es necesario cambiar el plan de semaforización de acuerdo a cada patrón de tráfico.



El proceso de cambiar de un plan de semaforización a otro se define como la transición. Durante la transición, la señal de semaforización se modifica para lograr la coordinación y varios cambios de desfase, tiempos de verde, o la duración del ciclo, o todos estos cambios a la vez deben ser realizados. Ajustar un plan de semaforización puede tener un impacto negativo en el nivel de servicio debido a que las señales de tráfico están operando con valores sub-óptimos (McShane & Roess, 2011) y la progresión del tráfico se interrumpe. Estos efectos se producen tanto si los planes se establecen por la hora del día (TOD), como para las operaciones de selección como respuesta al patrón de tráfico (TRSP), los sistemas adaptativos o los sistemas de preferencia por emergencia (Lee & Williams, 2012; Obenberger & Collura, 2001; Obenberger & Collura, 2007; Stevanovic, 2010).

La transición puede ser una manera importante de mejorar la eficiencia de los sistemas de señales, incluso en los sistemas adaptativos y sistemas de señales de preferencia, donde se acentúa la necesidad de mejores algoritmos de transición porque la transición entre los planes de semaforización se produce con más frecuencia y sus efectos se hacen más pronunciados y significativamente más trascendentes.

A pesar de la importancia del desempeño de la transición, se han realizado muy pocos estudios. Se hicieron estudios previos sobre la optimización de los procesos de transición entre la década de 1970 y principios de los años 1980. En los últimos años se ha logrado muy poco progreso en este tema. Un número limitado de proyectos de investigación llevados a cabo hasta la fecha sobre las estrategias de transición se ha centrado en la evaluación de las medidas de impacto y rendimiento cuando se utilizan diferentes estrategias de transición en diferentes condiciones de tráfico. Los métodos de transición propuestos eran métodos empíricos basados en la experiencia y no toman ventaja de las técnicas de modelado, matemáticos y de optimización actuales. Durante 1970-1981, la mayoría de los artículos abordan los métodos aplicados y sólo un método matemático se propuso (Lieberman & Wicks, 1974), en el que el algoritmo RAST fue diseñado para minimizar la duración del período de transición en los nodos críticos. En las últimas dos décadas, la misma tendencia se mantuvo; los métodos aplicados eran más numerosos que los métodos



matemáticos. Sin embargo; se hicieron más intentos para diseñar nuevos métodos matemáticos: Abbas *et al.* (2001) presentó un algoritmo de la señal de transición de tráfico como un enfoque de optimización integrada; Selekwa *et al.* (2003) propuso una metodología para optimizar el flujo de tráfico mediante la optimización de una función cuadrática de la demora en un modelo dinámico y Lee y Williams (2012) presentan un modelo matemático no lineal que proporciona la minimización de la demora.

Además, los métodos matemáticos existentes buscan optimizar una sola medición de la eficiencia y minimizar sólo los factores secundarios tales como la variación de los parámetros o el tiempo transcurrido en la transición, que puede ser visto como una desventaja porque para asemejarse a las condiciones existentes se requieren métodos más complejos. Esta situación fue planteada por Selekwa *et al.*, (2003) el cual afirma que los métodos existentes por lo general no se basan en ningún procedimiento de optimización y las mediciones de flujo de tráfico no están optimizados. Como resultado, surge la necesidad de un método matemático más complejo capaz de parecerse en una forma más precisa a las condiciones reales.

Como se puede ver arriba, hay un número limitado de estudios dirigidos a la optimización de la eficacia de las medidas operativas durante la transición utilizando modelos matemáticos y éstos incluyen sólo una medición de la eficiencia como objetivo de optimización. En consecuencia, hay una oportunidad para diseñar nuevos modelos matemáticos que proporcionen soluciones al problema de la transición al optimizar simultáneamente más de una medida de eficiencia y el uso de técnicas de solución avanzadas. En general, una notoria brecha de investigación se identificó debido a la falta de estudios y nuevas propuestas de métodos matemáticos para optimizar la fase de transición.

El propósito de este capítulo es desarrollar un modelo matemático integral para mejorar el desempeño de la transición entre los planes de semaforización en las intersecciones coordinadas. El modelo matemático propuesto en este punto incluye la minimización de un costo social que incluye una reducción en la demora, las emisiones de gases y el consumo de combustible. Hay muchas justificaciones para utilizar este modelo matemático. Se trata de un enfoque rentable para reducir problemas como



excesivos tiempos de viaje, las emisiones contaminantes y el consumo de combustible. Al dar solución al problema de la congestión, por lo general las soluciones son elegidas por separado, haciendo la exacerbación de otros problemas. Sólo considerando múltiples objetivos, el valor total de un modelo matemático puede ser potenciado. El objetivo del modelo propuesto es generar una amplia gama de beneficios directos e indirectos. Principalmente se pretende minimizar el costo relacionado con la demora, el combustible y las emisiones de gas. Sin embargo; este enfoque puede también conducir a una reducción de kilometraje que disminuye la depreciación del vehículo, desgaste y desgarre, el costo del petróleo y el costo de mantenimiento (reparación y sustitución). Un algoritmo de colonia de hormigas se utiliza para encontrar los parámetros óptimos de coordinación y para determinar el tiempo requerido durante la transición. Por último, se realiza una evaluación de la eficacia del nuevo modelo para obtener mejores medidas de rendimiento basado en su capacidad para minimizar el tiempo de viaje, las paradas, la demora, y las emisiones de contaminación del aire y el consumo de combustible.

Este capítulo se estructura de la siguiente manera: En la sección 5.2, se explica la formulación del modelo matemático del problema de la transición. En la sección 5.3, se presenta el problema de optimización de la transición, y, por último, en la Sección 5.4, un caso de estudio se presenta para evaluar y discutir los resultados del modelo y algoritmo diseñado.

5.2. Diseño modelo matemático

El modelo matemático para la transición entre los planes de semaforización que se propone en este estudio está orientado a minimizar la demora, el consumo de combustible y las emisiones de gases al aire durante el período de transición. La función del costo social establecida sigue el diseño propuesto en el capítulo 4. Para esto, el número de pasos de transición, las variaciones de desfase, longitudes de ciclo y tiempos de verde se definen como variables de control para lograr el objetivo. Este modelo sólo tiene en cuenta el efecto de las señales en la demora, el consumo de combustible y las emisiones de gases en las intersecciones. En esta sección se presenta la formulación matemática del problema de transición.



5.2.1. Aproximaciones y consideraciones básicas del modelo

Esta investigación propone un modelo matemático no lineal donde la transición se representa como un proceso dinámico, orientado a mantener la progresión y suavizar el cambio en los parámetros de coordinación de un plan de semaforización a otro. Esto significa hacer un ajuste suave y simultáneo de los desfases, la duración del ciclo y fase en verde con el fin de minimizar el costo social total.

En este orden de ideas, el modelo matemático de transición propuesto tiene consideraciones básicas. El modelo está orientado a reducir al mínimo la demora, el consumo de combustible y la emisión de gases al aire durante el período de transición en función del coste social establecido para cada componente del modelo. Para lograr esto, el número de pasos en la transición, las variaciones de desfase, longitudes de ciclo y fase verde se definen como variables de estudio para lograr el mínimo impacto social expresado en términos monetarios.

Esta función sólo tiene en cuenta el efecto de las señales en la demora, el consumo de combustible y las emisiones de gases en las intersecciones. Este supuesto es importante debido a que la demora causada por una parada afecta de manera particular la aceleración del vehículo y la trayectoria de desaceleración, el consumo de combustible y las emisiones al aire. La presencia de las señales de tráfico provoca interrupciones en el flujo de tráfico, los vehículos desaceleran cuando se acercan a una línea de parada y la señal se vuelve roja. Luego, se detienen hasta que la señal se vuelve verde. Por último, los vehículos aceleran para pasar la intersección (Liu, 2008). Este concepto se utiliza suponiendo que no hay cola inicial y no hay demora en la fila al moverse.

Para definir las restricciones que constituyen el espacio de posibles soluciones para el procedimiento de transición se sigue la estrategia implementada por Lee y Williams (2012) donde para mantener la coordinación de las señales de un ciclo a otro cada intersección debe ser operada con un tamaño de ciclo común, así los cambios graduales en los desfases u *offset* se asocian con cambios graduales específicos en la duración un ciclo común y viceversa. Por otra parte, además de la optimización conjunta de los desfases y la duración del ciclo, la estrategia de transición propuesta



suaviza el requisito de una longitud de ciclo común durante el período de transición. Los autores demostraron que esta técnica resulta en una transición más eficiente. También se definen restricciones de precedencia para asegurar que las variaciones totales de las variables de control se encuentren dentro de los niveles de cambio establecidos durante el período de transición. Por último, se contemplan las condiciones de la estructura estándar definida por la asociación nacional de fabricantes eléctricos (NEMA por sus siglas en inglés) para tiempos de señal.

5.2.2. Formulación del problema

El problema se formula como un modelo matemático no lineal donde la transición se representa como un proceso dinámico en el tiempo, orientado a mantener la progresión y para suavizar el ajuste de los parámetros de coordinación, desfases, y la longitud del ciclo y fase verde, de todas las intersecciones de una arteria. Este modelo está limitado en su alcance para desarrollar sólo los problemas asociados con la transición entre los planes de semaforización y para medir la efectividad del modelo propuesto en función de los costos sociales relacionados con la demora, el consumo de combustible y las emisiones de gases.

Entonces, el modelo matemático propuesto se limita a encontrar el número de ciclos durante la transición o los números de pasos para lograr la transición y el cambio de los parámetros de coordinación durante los ciclos de transición. Este modelo considera las condiciones básicas tales como las relaciones de precedencia entre los periodos de transición, la duración del ciclo y las limitaciones para las fases de tiempo en verde g_{ijm} de acuerdo con la norma establecida por NEMA, con el fin de minimizar el costo social (CS).

Matemáticamente, el problema de la transición se define como:

Minimizar SC

$$\sum_j^n \sum_i^I VT \cdot \sum_m^M [\sum_v^V OR_v \cdot D_{ijmv}(g_{ijm}, C_{ij}, q_{ijmv})] + \sum_j^n \sum_i^I \sum_m^M [\sum_v^V OC_v \cdot FC_{ijmv}(g_{ijm}, C_{ij}, q_{ijmv})] + \sum_j^n \sum_i^I \sum_e^E [ECC_e \cdot \sum_m^M \sum_v^V GE_{ijmve}(g_{ijm}, C_{ij}, q_{ijmv})] \tag{5.1}$$



Sujeto a

$$C_j^c = C_{j-1}^c + (\Delta C)_j^c \quad \text{para } 1 \leq j \leq n \quad (5.2)$$

$$C_{ij} = C_j^c + (\Delta\varphi)_{ij} \quad \text{para } 1 \leq i \leq I, 1 \leq j \leq n \quad (5.3)$$

$$\varphi_{ij} = \varphi_{ij-1} + (\Delta\varphi)_{ij} \quad \text{para } 1 \leq i \leq I, 1 \leq j \leq n \quad (5.4)$$

$$g_{ijm} = g_{ij-1m} + (\Delta g)_{ijm} \quad \text{para } 1 \leq i \leq I, 1 \leq j \leq n, 1 \leq m \leq M \quad (5.5)$$

$$\sum_{j=1}^n (\Delta C)_j^c = C_{if} - C_{io} \quad \text{para } 1 \leq i \leq I, 1 \leq j \leq n \quad (5.6)$$

$$\sum_{j=1}^n (\Delta\varphi)_{ij} = \varphi_{if} - \varphi_{io} \quad \text{para } 1 \leq i \leq I, 1 \leq j \leq n \quad (5.7)$$

$$\sum_{j=1}^n (\Delta g)_{ijm} = g_{ifm} - g_{iom} \quad \text{para } 1 \leq i \leq I, 1 \leq j \leq n, 1 \leq m \leq M \quad (5.8)$$

$$C_{ij-1} \leq C_{ij} \leq C_{if} \quad \text{para } 1 \leq i \leq I, 1 \leq j \leq n \quad (5.9)$$

$$\varphi_{ij-1} \leq \varphi_{ij} \leq \varphi_{if} \quad \text{para } 1 \leq i \leq I, 1 \leq j \leq n \quad (5.10)$$

$$g_{ij-1m} \leq g_{ijm} \leq g_{ifm} \quad \text{para } 1 \leq i \leq I, 1 \leq j \leq n \quad (5.11)$$

$$C_{ij} = \sum_{m=1}^4 (g_{ijm} + y_{ijm} + r_{ijm}) \quad \text{para } 1 \leq i \leq I, 1 \leq j \leq n, 1 \leq m \leq M \quad (5.12)$$

$$g_{ij1} + g_{ij2} = g_{ij5} + g_{ij6} \quad \text{para } 1 \leq i \leq I, 1 \leq j \leq n \quad (5.13)$$

$$g_{ij3} + g_{ij4} = g_{ij7} + g_{ij8} \quad \text{para } 1 \leq i \leq I, 1 \leq j \leq n \quad (5.14)$$

$$1 \leq n \leq \frac{Tf}{C_{io}} \quad \text{para } 1 \leq i \leq I \quad (5.15)$$

La notación utilizada en la formulación del problema se da en la Tabla 10.

SC se define como la suma del costo del conductor o usuario y el costo ambiental (Ecuación 5.1). Los costos del conductor debido a una demora promedio por vehículo y el consumo de combustible incluyendo el costo de tiempo para las personas en los vehículos y los costos de operación de vehículos. El costo se calcula utilizando el tiempo de ocupación de los vehículos (OR_v), el ingreso promedio y un valor del factor de tiempo que convierte el ingreso promedio en un valor de tiempo (VT) (Akçelik & Besley, 2003). Los costos de operación de los vehículos OC_v están compuestos por los costos de combustible, neumáticos, aceite, reparación y mantenimiento. Los costos ambientales son el precio o una evaluación monetaria de las emisiones de gases de efecto invernadero (ECG_e).



Notación

| | |
|------------------|--|
| i | La intersección |
| j | El paso de la intersección |
| n | El número total de pasos de la intersección |
| m | Fase o movimientos por pasos de transición |
| v | Tipo de vehículo |
| e | Tipo de emisión (gas) |
| VT | Valor del tiempo (\$US/hora) |
| OR_v | Ocupación promedio del vehículo o tasa de ocupación por tipo de vehículo v |
| D_{ijmv} | Demora total de la intersección i al paso de la transición j para el movimiento m por tipo de vehículo v (s) |
| g_{ijm} | Tiempo efectivo en verde de la intersección i al paso de la transición j para el movimiento m (s) |
| C_{ij} | Longitud del ciclo de la intersección i al paso de la transición j (s) |
| OC_v | Costo de operación por tipo de vehículo v (\$US/gal) |
| FC_{ijmv} | Consumo de combustible en la intersección i al paso de la transición j por movimiento por tipo de vehículo v (gal) |
| ECC_e | Costo ambiental de la emisión de gas e (\$US/mg) |
| GE_{ijmve} | Emisión de gas e en la intersección i al paso de la transición j para el movimiento m por tipo de vehículo v |
| q_{ijmv} | Tasa de flujo de la demanda real o proyectada de la intersección i al paso de transición j para el movimiento m por tipo de vehículo v (veh/h) |
| Tf | Duración del period de análisis (h) |
| C_j^c | Duración del ciclo común, al paso de la transición j (s) |
| $(\Delta C)_j^c$ | Cambio en la duración del ciclo común al paso de la transición j (s) |



| | |
|------------------------|--|
| C_{io} | Duración del ciclo de intersección i al paso o (antes del periodo de transición) (s) |
| C_{if} | Duración del ciclo de transición i al paso $n + 1 = f$ (después del periodo de transición) (s) |
| $(\Delta\varphi)_{ij}$ | Cambio de desfase de la intersección i al paso de transición j (s) |
| φ_{ij} | Desfase de la intersección i al paso de la transición j (s) |
| φ_{io} | Desfase de la transición i al paso o (antes del periodo de transición) (s) |
| φ_{if} | Desfase de la intersección i al paso $n + 1 = f$ (después del periodo de transición) (s) |
| $(\Delta g)_{ijm}$ | Cambio del tiempo en verde efectivo (ruptura) i al paso de transición j por movimiento m (s) |
| g_{iom} | Tiempo en verde efectivo de la intersección i al paso o (antes del periodo de transición) por movimiento m (s) |
| g_{ifm} | Tiempo en verde efectivo de la intersección i al paso $n + 1 = f$ (después del periodo de transición) por movimiento m (s) |
| y_{ijm} | Tiempo en amarillo de la intersección i al paso de transición j por movimiento m (s) |
| r_{ijm} | Tiempo en rojo de la intersección i al paso de transición j por movimiento m (s) |

Tabla 10. Notación modelo matemático

En esta función, el modelo de demora del *Manual Highway Capacity* (HCM) ("B. National Research Council. Transportation Research.," 2010), fue seleccionado para estimar la demora promedio por control por vehículo para cada intersección en un corredor o arteria, suponiendo que no hay cola inicial. Este modelo de demora se expresa en términos de la duración del ciclo y el tiempo en verde y el flujo de tráfico. Los componentes de consumo de combustible y las emisiones de gases incluidos se estiman de acuerdo a los modelos propuestos por Akçelik (1983) y Frey, et al.,(2001). Con el fin de evaluar el impacto de las intersecciones señalizadas sobre el consumo de combustible y las emisiones al aire, los dos componentes se basan en la suposición de



tres cantidades independientes que corresponden a tres modos de conducción: espera, aceleración y desaceleración.

5.2.3. Variables del problema de transición y espacio de restricciones

El modelo matemático de transición propuesto tiene cuatro (4) variables de decisión: el número de pasos de la transición n , el cambio en el desfase u *offset* $(\Delta\varphi)_{ij}$, el cambio de la longitud del ciclo común $(\Delta C)_j^c$ y el tiempo efectivo en verde $(\Delta g)_{ijm}$. El número de pasos de la transición n , es el número de ciclos necesarios para completar la transición. El cambio de desfase $(\Delta\varphi)_{ij}$ es la variación de desfase entre los pasos de transición, donde el desfase se define como el inicio del tiempo en verde en la fase coordinada de una intersección en relación con el inicio del tiempo en verde en una intersección de referencia. El cambio de longitud del ciclo común $(\Delta C)_j^c$ es la variación de la duración del ciclo común entre los pasos de transición, donde la longitud del ciclo es el tiempo necesario para completar una rotación a través de todas las fases y debe ser el mismo para todas las intersecciones para mantener una relación basada en el tiempo coherente con el plan de coordinación (Koonce *et al.*, 2008). El cambio en la fase verde $(\Delta g)_{ijm}$ es la variación en los tiempos de verde en cada fase o movimiento.

El espacio de posibles soluciones factibles está definido, primero, por las restricciones que garantizan un ciclo común a lo largo de la transición, segundo, las restricciones de precedencia y tercero, las restricciones para cumplir las normas establecidas por NEMA para señales de semaforización. Por esta razón, los parámetros óptimos para los planes de semaforización se determinan en los periodos antes y después de la transición.

En el modelo de transición propuesto las restricciones se explican como sigue: La ecuación 5.2 define una longitud de ciclo común para todas las intersecciones de la arteria coordinada definido como la longitud del ciclo (C_j^c) . Esta restricción permite la existencia de longitudes de ciclo igual y considera la relación entre el desfase y la longitud de ciclo en todas las intersecciones de cada paso de transición que es necesario para proporcionar un funcionamiento progresivo entre intersecciones. Las ecuaciones 5.3-5.5 permiten obtener el plan de transición de semaforización o los valores de los parámetros de coordinación, la duración del ciclo, el tiempo de la fase



verde (g_{ijm}) y desfases (φ_{ij}), en función del cambio (Δ), para todas las intersecciones en cada etapa de transición. Las ecuaciones 5.6-5.8 permiten la variación total en los parámetros de coordinación que están dentro del nivel de cambio establecido para el los tiempos de reparto del semáforo antes y después del plan de transición de la señal. Las ecuaciones 5.9-5.11 son las restricciones de precedencia; permiten que los parámetros de coordinación se encuentren dentro del intervalo entre la longitud de ciclo de la etapa anterior y la duración del ciclo después de la transición. Las ecuaciones 5.12-5.14 son las condiciones para la estructura de anillo estándar según la norma NEMA para tiempos de señal. La ecuación (5.15) establece el número de pasos de la transición en términos del tiempo de período de análisis (Tf), la longitud del ciclo inicial C_{io} y la longitud de ciclo final C_{if} , respectivamente.

5.3.Optimización de la colonia de hormigas

Par resolver el modelo matemático de la transición propuesto en la sección 5.2 , el problema puede ser visualizado y representado en la forma de un problema de Optimización de la Colonia de Hormigas (ACO), donde un algoritmo ACO es diseñado para encontrar los parámetros de transición que minimizan el costo social.

ACO está inspirado en el comportamiento cooperativo de las colonias de hormigas reales en su proceso para encontrar una fuente de comida (Rao & Rao, 2009). Estas hormigas depositan una sustancia química, llamada feromona, la cual es acumulada y también evaporada, con el fin de marcar una trayectoria favorable que debe ser seguida por otros miembros de la colonia. La Colonia de Hormigas es un algoritmo iterativo. En cada iteración, un conjunto de posibles soluciones son construidas a través de un número de hormigas artificiales (Dorigo, Birattari, & Stutzle, 2006). En cada paso, las hormigas viajan una ruta más corta, siguiendo el rastro de feromona dejado por otras hormigas. Los rastros de feromonas tienden a evaporarse, por lo tanto disminuye cuando pocas hormigas viajan en el camino y aumenta cuando muchas hormigas viajan en el camino. En consecuencia, en los caminos largos la feromona se evapora más rápido y en los caminos cortos ocurre lo contrario, este fenómeno hace que todas las hormigas viajen por el camino más corto.



La optimización de la Colonia de Hormigas fue diseñada por Dorigo y Caro (1999) como una metaheurística o un algoritmo que puede ser aplicado a diferentes problemas de optimización con pocas modificaciones. Inicialmente, este algoritmo fue utilizado para resolver un problema de un solo objetivo basado en el problema del vendedor viajero (TSP) pero recientemente ha sido aplicado en problemas de optimización combinatorios tal como problemas de programación de distribución, ruteo de vehículo, problema de ferrocarril, entre otras aplicaciones (Chang, Li, & Chiang, 2014; Kim & Joo, 2012; Santos, Coutinho-Rodrigues, & Current, 2010; Vitins & Axhausen, 2009; Yaghini, Foroughi, & Nadjari, 2011). ACO ha sido aplicado a optimización de sistemas de transporte y señales de tráfico, pero estas investigaciones han estado orientadas a encontrar los parámetros óptimos para planes de semaforización específicos en función de la demanda de tráfico (D'Acierno, Gallo, & Montella, 2012; He & Hou, 2012; Putha, Quadrifoglio, & Zechman, 2012).

En esta investigación, se diseñara un algoritmo ACO que genera parámetros de coordinación durante los ciclos para lograr el cambio de planes, esto es un plan de reparto de tiempos del semáforo para cada paso que se requiera para lograr la transición. Con el plan de transición encontrado, el coste social se determina, el cual se utiliza para evaluar la transición real y la mejora en la siguiente iteración del conjunto de parámetros de coordinación. Esto se repite hasta que la solución converja a un valor mínimo o se alcance un máximo número de iteraciones. Los pasos que describen la aplicación del algoritmo ACO para resolver el problema de minimización descrito anteriormente se muestra en la Figura 21. Las siguientes subsecciones describen en detalle los pasos de la figura 21.

5.3.1. Preparar la colonia de hormigas

El algoritmo comienza asumiendo un número de hormigas en la colonia (C). En este problema, tres subtipos de hormigas se definen (AntD, AntF y AntE) y todos están asociados con el costo de retardo, el costo del consumo de combustible y el costo de las emisiones al aire, respectivamente. El número de hormigas para cada subtipo es la tercera parte de la población total u hormigas en la colonia, esto es, todos los componentes de la función objetivo son igualmente importantes.



5.3.2. Construir un espacio de solución para la colonia de hormigas

Las hormigas se colocan aleatoriamente en un espacio de la solución que representa una estructura multi-dimensional, donde se definen todas las posibles soluciones del problema. Se supone un conjunto de posibles valores discretos para cada una de las variables del problema. Para esto, es necesario definir una única solución. En este caso, el modelo de transición matemático propuesto tiene cuatro (4) variables de decisión: número de pasos de la transición n , cambio en el desfase u *offset* $(\Delta\varphi)_{ij}$, cambio en la longitud de ciclo común, $(\Delta C)_j^c$ y cambio en el tiempo de verde efectivo $(\Delta g)_{ijm}$.

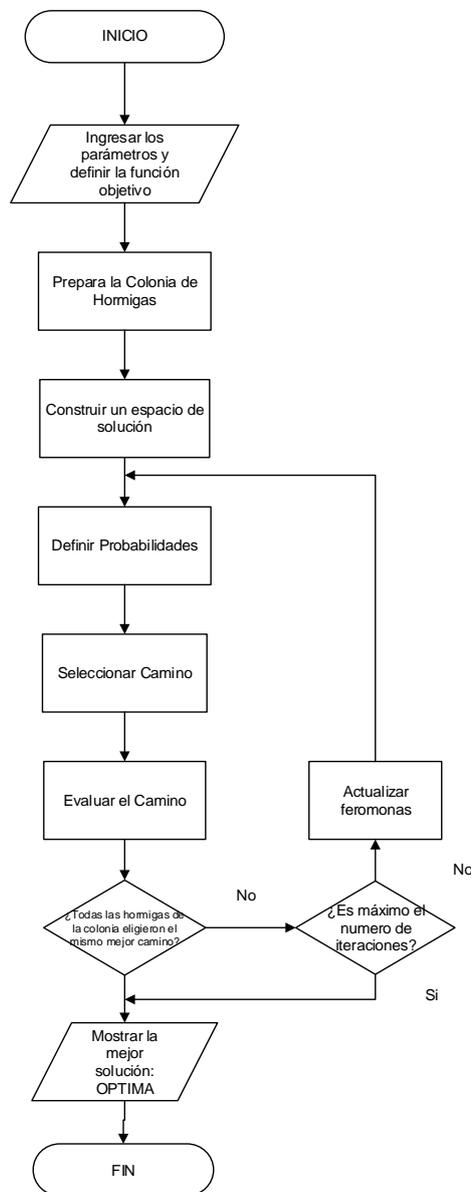


Figura 21. Diagrama de flujo de un algoritmo de optimización de Colonia de Hormigas propuesto



Analizando el modelo matemático formulado en la sección 5.2.2 se observa que la longitud de ciclo (C_{ij}) puede ser calculado a partir de $(\Delta C)_j^c$ y el cambio en el desfase $(\Delta\varphi)_{ij}$ usando la ecuación 5.3. A su vez, el cambio en el tiempo de verde efectivo $(\Delta g)_{ijm}$ puede ser obtenido a partir de la longitud de ciclo (C_{ij}) usando las ecuaciones 5.5 y 5.12-5.14, pero las variables de decisión n , $(\Delta C)_j^c$ y $(\Delta\varphi)_{ij}$ deben ser conocidas para encontrar una solución. Esto significa que es necesario obtener un conjunto de valores diferentes para cada una de las variables. Mientras que la variable de decisión n , está restringido por el modelo como un número entero partir de la ecuación 5.15, el ciclo común de cambio de longitud $(\Delta C)_j^c$ y cambio en el desfase $(\Delta\varphi)_{ij}$ son dos matrices multidimensionales, por lo tanto, tiene mucha más formas posibles de ser generados.

Sin embargo para los índices i y j , los valores de $(\Delta C)_j^c$ y $(\Delta\varphi)_{ij}$ están restringidos por la ecuación 5.2 y 5.4, por lo que sólo pueden variar de forma independiente a través del índice j . Para evitar la generación de valores aleatorios para llenar cada una de las j sub-matrices de $(\Delta C)_j^c$ y $(\Delta\varphi)_{ij}$, estos valores se interpolan con una función exponencial, al mismo tiempo, esto permite que las soluciones obtenidas sean analizadas más adecuadamente con el fin de inferir reglas que conducen a una mejor comprensión de ellos.

Considerando lo anterior, las ecuaciones 5.2 y 5.4 se redefinen como sigue:

$$C_j^c = C_{io} + (C_{if} - C_{io}) \left(\frac{j}{n}\right)^{cpow} \quad \text{Para } 1 \leq i \leq I, 1 \leq j \leq n \quad (5.16)$$

$$\varphi_{ij} = \varphi_{io} + (\varphi_{if} - \varphi_{io}) \left(\frac{j}{n}\right)^{\varphi pow} \quad \text{Para } 1 \leq i \leq I, 1 \leq j \leq n \quad (5.17)$$

Los valores de C_{io} y C_{if} se dan como parámetros (son conocidos pues son los valores óptimos para los planes antes y después) en todas las intercepciones $i \in I$, así como todos los valores para φ_{io} y φ_{if} para todas las intercepciones $i \in I$, en consecuencia, las únicas variables desconocidas en las ecuaciones 5.16 y 5.17 serían $cpow$ y φpow , que son exponentes que permiten que la salida de la función varié de acuerdo con los valores que estos presenten, por lo tanto, una solución puede generarse sólo con tres variables: n , $cpow$ y φpow , que son las tres dimensiones del espacio de solución.



Diferentes valores de $cpow$ y φpow generan diferentes interpolaciones para una solución, pero una de las propiedades de las funciones exponenciales son:

$$\forall x \in [0,1] \quad x^a \leq 1 \quad \text{if } a \geq 0 \tag{5.18}$$

Entonces, si $\varphi pow \geq 0$ $cpow \geq 0$ entonces para, $1 < j < n$ tenemos:

$$(\Delta\varphi)_{i1} \leq (\Delta\varphi)_{ij} \leq (\Delta\varphi)_{in} \tag{5.19}$$

$$(\Delta C)_{i1} \leq (\Delta C)_j^c \leq (\Delta C)_{in} \tag{5.20}$$

Además, como la función exponencial es monótona creciente en todo su dominio, las ecuaciones 5.2 y 5.4 siempre se respetan.

Entonces, el espacio de la solución es una estructura tridimensional que contiene todas las triplete posibles compuestas por: n , $cpow$ y φpow , por lo tanto:

$$S = \{(n, c, \varphi); n \in \mathbb{N}, cpow \in CPow, \varphi pow \in \Phi Pow\} \tag{5.21}$$

Donde \mathbb{N} son todos los posibles valores para n , y $CPow$ y ΦPow ; y $CPow$ y ΦPow contienen todos los posibles valores para $cpow$ y φpow respectivamente.

Los valores de $cpow$ y φpow afectan las interpolación en las ecuaciones 5.16 y 5.17. Para valores menores a 1, definen un crecimiento inicialmente rápido y valores superiores a 1 describen exactamente lo contrario. Finalmente, cuando $cpow$ y φpow es igual a 1, con ellos se obtienen funciones de interpolación lineal, como se muestra en la Figura 22.

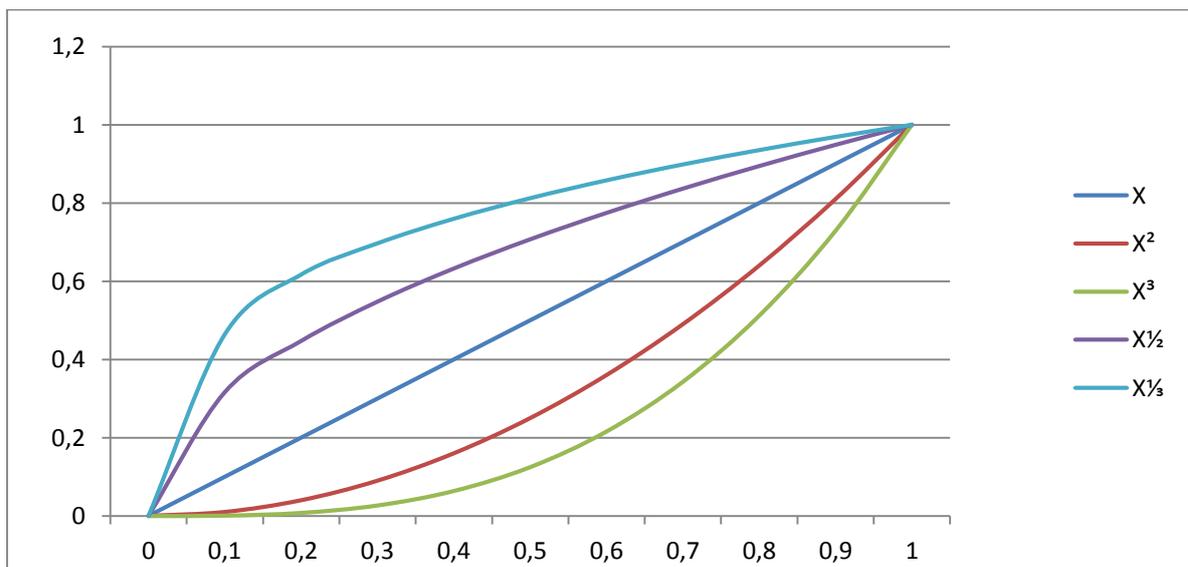


Figura 22. Función exponencial para la interpolación de sub matrices



Por lo tanto es posible definir un rango razonable para $cpow$ y φpow , lo que permite la comparación de los diferentes comportamientos de la función objetivo, así:

$$\{x, 1 \geq x \geq 10, x \in \mathbb{N}\} \cup \left\{ \frac{1}{x}, 1 > x \geq 10, x \in \mathbb{N} \right\} \quad (5.22)$$

Estos valores pueden variar ya que son parámetros a partir de los cuales se construye el espacio de la solución.

5.3.3. Definir probabilidades

Una vez que la colonia de hormigas y el espacio de soluciones son creadas, las hormigas pueden empezar a moverse. Así al principio del algoritmo, hormigas de diferentes tipos son distribuidos al azar, a través del espacio solución. Cada hormiga debe ser inicializada con valores de sus coordenadas en los ejes n , $cpow$ y φpow que se utilizan como parámetros para generar la solución correspondiente a la ubicación en el espacio.

Moverse para una hormiga significa cambiar su posición de un punto en el espacio de la solución a otro, generando una nueva solución cada vez que lo hace. Sin embargo, hay algunas restricciones: en primer lugar, la siguiente posición no debe haberse visitado antes por la misma hormiga y en segundo lugar, que dicho punto debe ser un punto vecino, que son aquellos que se obtienen ya sea por adición o sustracción de una unidad hacia exclusivamente una de las coordenadas n , $cpow$ y φpow de la posición actual. El número de movimientos para cualquier hormiga se da como un parámetro para el algoritmo, y este se define como iteraciones.

En el algoritmo ACO, si una hormiga puede moverse a más de un punto vecino, este es decidido por la probabilidad:

$$p_{(n,cpow,\varphi pow)}^k = \frac{(\tau_{n,cpow,\varphi pow}^\alpha)(\eta_{n,cpow,\varphi pow}^\beta)}{\sum (\tau_{n,cpow,\varphi pow}^\alpha)(\eta_{n,cpow,\varphi pow}^\beta)} \quad (5.23)$$

Donde $\tau_{n,cpow,\varphi pow}$ es la cantidad de feromona depositada en el punto $(n, cpow, \varphi pow)$ de un espacio solución, $\alpha \geq 0$ es un parámetro para controlar la influencia de $\tau_{n,cpow,\varphi pow}$, $\eta_{n,cpow,\varphi pow}$ es el atractivo de un punto en el espacio y $\beta \geq 1$ es un parámetro para controlar la influencia de $\eta_{n,cpow,\varphi pow}$.



5.3.4. Seleccionar y evaluar los caminos

La solución de clase proporciona toda la funcionalidad necesaria para obtener el valor de salida del costo social o función objetivo a ser minimizado. Las hormigas definen este valor, dependiendo de sus tipos AntD, AntF y AntE, respectivamente, para obtener el atractivo de sus puntos vecino en el espacio de la solución.

$$\eta_{n,cpow,\varphi pow} = f_o(n, cpow, \varphi pow) \quad (5.24)$$

Donde f_o es la función objetivo correspondiente al tipo de hormiga.

5.3.5. Actualizar feromonas

Cada vez que las hormigas se mueven a través del espacio de soluciones dejan un rastro de feromonas, que se acumula en una matriz de punto flotante en tres dimensiones dentro de la clase Espacio Solución. Esta matriz se actualiza como sigue:

Para cada hormiga, se añade un rastro de feromonas en el mismo punto del espacio de soluciones donde se encuentra la hormiga, y en los puntos vecinos, y actualiza las feromonas, en valores discretos de variables de diseño, como

$$\tau_{n,cpow,\varphi pow} = \tau_{n,cpow,\varphi pow} + \lambda * \delta \quad (5.25)$$

Donde λ representa el rastro de feromona y δ un valor inversamente proporcional a la distancia de un punto vecino al punto original donde la hormiga fue localizada.

Al final de cada iteración, el rastro evapora:

$$\tau_{n,cpow,\varphi pow} = (1 - \rho)\tau_{n,cpow,\varphi pow} \quad (5.26)$$

Donde ρ es el coeficiente de evaporación de la feromona y λ es un valor que representa el rastro dejado por la hormiga.

El proceso ACO es finalizado si ya sea el número de las iteraciones definidas se alcanza o hasta que el proceso converge, esto es todas las hormigas eligen el mismo mejor camino.

5.4. Caso de estudio

Una arteria lineal hipotética adaptada del caso presentado por Lee y Williams (2012), se utiliza para aplicar el modelo matemático para la transición diseñado y así poder



evaluar los efectos del plan de transición optimizado mediante ACO, en el tiempo de viaje, paradas, retrasos o demora, las emisiones de contaminación al aire y el consumo de combustible, así como el impacto, de este, en los costes sociales durante el período de transición.

En este caso, la arteria en estudio está compuesta por tres intersecciones señalizadas (Figura 23), donde cada aproximación de las intersecciones consta de un carril exclusivo para giros a la izquierda y 3 carriles completos para la calle principal y 1 carril completo para las calles secundarias, como se muestra en la Figura 24. Las tasas de flujo vehicular para cada intersección se establecen en 15%, 75% y 10% para giros a la izquierda, movimientos a través de la intersección y giros a la derecha, respectivamente.

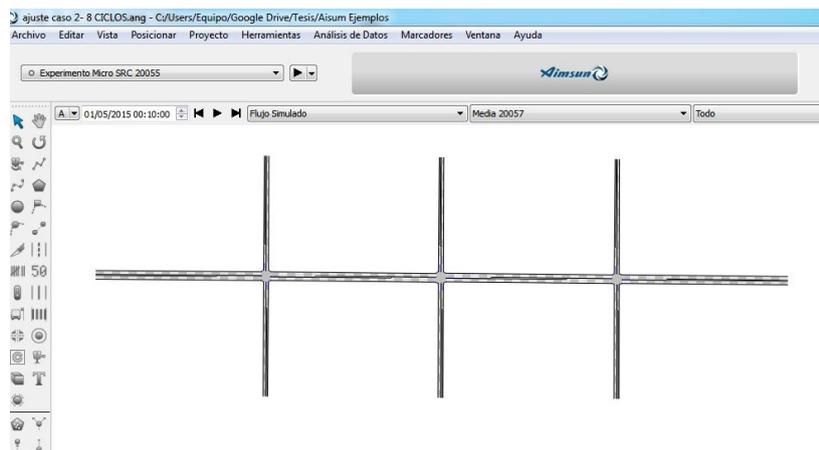


Figura 23. Esquema arteria con tres intersecciones para el caso de estudio

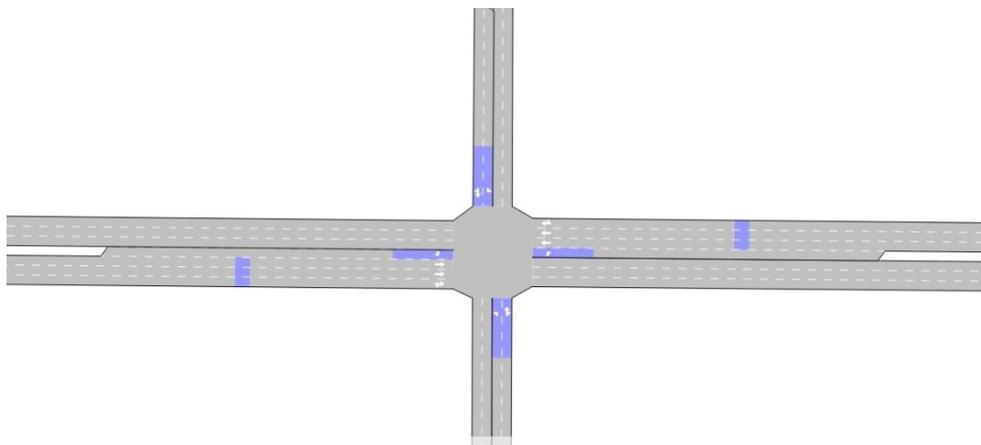


Figura 24. Esquema para cada intersección señalizada en el caso de estudio



El volumen de entrada de flujo vehicular para la arteria coordinada tiene una tasa de cambio de 55:45 a 45:55 durante el período de transición. Los tiempos o planes optimizados para las señales de tráfico antes y después de la transición se observan en la Tabla 11 y Tabla 12 respectivamente. La flota está compuesta por 98% de vehículos ligeros y 2% de vehículos pesados.

| Antes de la Transición | | | | | | | |
|------------------------|------------|-----------------|--------------------|-----------------|--------------------|-----------------|--------------------|
| Intersección | | 1 | | 2 | | 3 | |
| Fase | Movimiento | Tiempo de Verde | Tasa de flujo(v/h) | Tiempo de Verde | Tasa de flujo(v/h) | Tiempo de Verde | Tasa de flujo(v/h) |
| 1 | WBL | 13 | 177 | 11 | 151 | 10 | 132 |
| 2 | EBT | 20 | 866 | 22 | 1022 | 24 | 1225 |
| 3 | NBL | 9 | 77 | 9 | 78 | 9 | 82 |
| 4 | SBT | 23 | 361 | 23 | 362 | 22 | 379 |
| 5 | EBL | 13 | 153 | 13 | 180 | 14 | 216 |
| 6 | WBT | 20 | 1002 | 20 | 853 | 20 | 743 |
| 7 | SBL | 8 | 63 | 9 | 63 | 8 | 67 |
| 8 | NBT | 24 | 440 | 23 | 443 | 23 | 464 |
| Tamaño de Ciclo | | 65 | | 65 | | 65 | |
| Desfase | | 31 | | 0 | | 31 | |

Tabla 11. Datos de tiempos óptimos de la arteria antes de la transición

| Después de la Transición | | | | | | | |
|--------------------------|------------|-----------------|--------------------|-----------------|--------------------|-----------------|--------------------|
| Intersección | | 1 | | 2 | | 3 | |
| Fase | Movimiento | Tiempo de Verde | Tasa de flujo(v/h) | Tiempo de Verde | Tasa de flujo(v/h) | Tiempo de Verde | Tasa de flujo(v/h) |
| 1 | WBL | 29 | 294 | 23 | 246 | 21 | 208 |
| 2 | EBT | 31 | 1014 | 35 | 1165 | 38 | 1367 |
| 3 | NBL | 11 | 91 | 12 | 87 | 11 | 86 |
| 4 | SBT | 44 | 633 | 45 | 603 | 45 | 601 |
| 5 | EBL | 17 | 178 | 20 | 205 | 22 | 241 |
| 6 | WBT | 43 | 1671 | 38 | 1394 | 36 | 1180 |
| 7 | SBL | 13 | 111 | 13 | 107 | 12 | 106 |
| 8 | NBT | 42 | 517 | 44 | 493 | 45 | 491 |
| Tamaño de Ciclo | | 115 | | 115 | | 115 | |
| Desfase | | 69 | | 0 | | 69 | |

Tabla 12. Datos de tiempos óptimos de la arteria después de la transición

Los parámetros para la función de costo social son como sigue. El costo de tiempo por persona (VT) es 9,432 dólares/hora para vehículos ligeros y pesados y se calcula usando un ingreso promedio por hora de 23,58 dólares/h ("Bureau of labor statistics," 2012) y un factor de valor de tiempo como proporción del ingreso promedio por hora de 40%. El costo de operación por vehículo por galón de combustible es de 7,25 dólares/galón, calculado utilizando una unidad de costo por galón de 3,45 dólares/gal ("Energy Information Administration," 2012), el factor de costo de recursos de



combustible es de 70% y la relación costo/combustible es de 3. Los costos sociales marginales de las emisiones de gases de efecto invernadero para el dióxido de carbono (CO₂) es de 25 dólares/tC, que se toma a partir de un estudio realizado por Fankhauser (1994) en la que el valor de efecto invernadero CO₂ se estima para cuatro décadas 1991-2030. El peso promedio del monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC), y óxido de nitrógeno (NOx) para cada modo de conducción se calculan a partir de resultados experimentales de Tong *et al.* (2000) y de Wing-Tat *et al.* (2005), de igual forma el potencial de calentamiento global (GWP) para el CO, HC y NOx se calculará de acuerdo con Shine (2001). Estos valores y las tasas de ocupación para cada tipo de vehículo se muestran en la Tabla 13.

| | | Combustible (mg/seg) | CO (mg/seg) | GPW _{CO} | HC (mg/seg) | GPW _{HC} | Nox (mg/seg) | GPW _{NOx} | Tasa de Ocupación |
|------------------------------|-----------------------|-------------------------|----------------|-------------------|----------------|-------------------|-----------------|--------------------|----------------------|
| Vehículos ligeros | Aceleración | 62,62 | 9,54 | 3 | 0,69 | 12 | 0,62 | 40 | 1,3 |
| | Desaceleración | 28,11 | 9,96 | 3 | 0,58 | 12 | 0,69 | 40 | |
| | Espera | 18,11 | 2,99 | 3 | 0,36 | 12 | 0,14 | 40 | |
| Vehículos pesados | Aceleración | 133,1 | 12,63 | 3 | 2,36 | 12 | 13,94 | 40 | 1,2 |
| | Desaceleración | 117,1 | 10,92 | 3 | 1,96 | 12 | 11,65 | 40 | |
| | Espera | 25,9 | 7,5 | 3 | 1,15 | 12 | 4,04 | 40 | |

Tabla 13. Tasas y consumo de combustible y emisiones de gases de acuerdo con el modo de conducción y tipo de vehículo

El algoritmo ACO descrito en la sección anterior (5.3) se aplica para encontrar la transición óptima descrita por el modelo matemático diseñado. El procedimiento de optimización se realizó mediante el desarrollo de un código de programación escrito en Python 2.7 (Anexo 3). Después de configurar la función objetivo y el algoritmo de optimización Colonia de hormigas (ACO), dos pruebas fueron hechas para medir la correspondencia entre los parámetros del algoritmo diseñado y los valores fundamentales de la función objetivo.

En primer lugar, el algoritmo ACO se aplica para determinar, el impacto del número de hormigas utilizadas en los valores de los costes sociales. Para esta primera prueba, el número de hormigas oscilo entre 1 y 100 hormigas y el número de interacciones se estableció como un número fijo de 30. El ensayo se realizó 10 veces y los resultados se promediaron. Posteriormente, el impacto de las interacciones numéricas en los valores de la función objetivo es medido, para esto, el número de iteraciones osciló entre 1 y 100 iteraciones y el número de hormigas se fijó en 25. Para ambas pruebas, los



parámetros para el algoritmo ACO se establecen fijos como sigue: $\lambda = 0,85$, $\delta = 0,2$ y $\rho = 0,04$. Las pruebas se realizaron 10 veces y los resultados se detallan en las Figura 25 y 26.

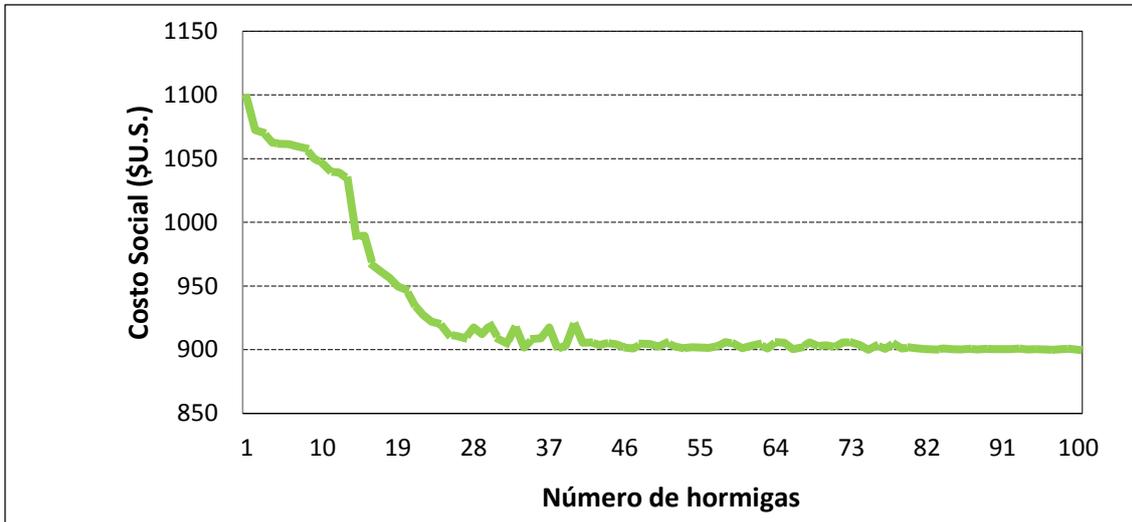


Figura 25. Convergencia ACO de acuerdo con el número de hormigas

Finalmente, se concluyó que el aumento de ambos parámetros hará que los costes sociales y el retraso promedio tienda a ser menor, pero ambos resultados son más sensibles al número de iteraciones. Esto es, debido al hecho de que el recuento de iteración decide cuánta cobertura tendrá cada hormiga, lo que le permite lograr soluciones más óptimas, mientras que el número de hormigas determina el número de áreas del espacio de soluciones que se cubren en el inicio del algoritmo.

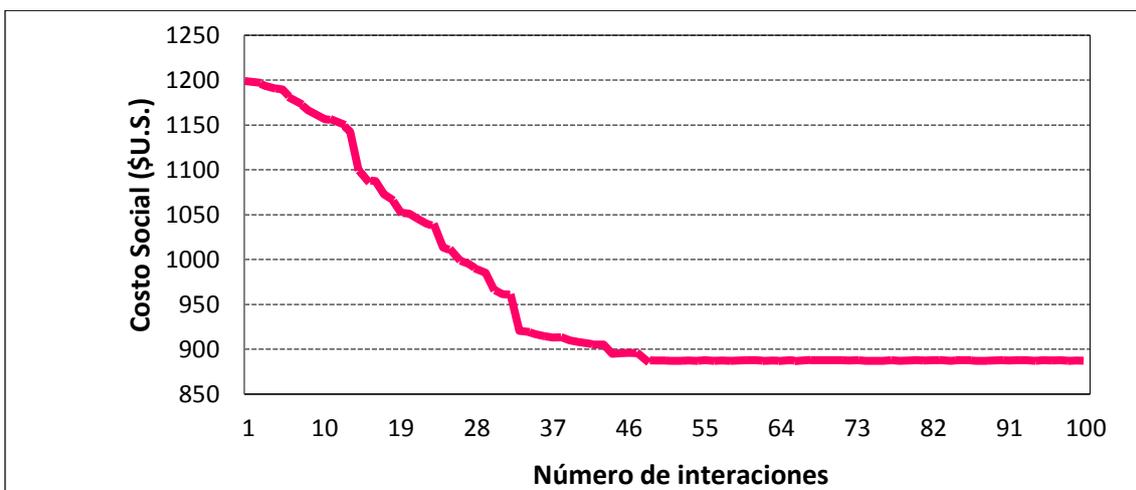


Figura 26. Convergencia ACO de acuerdo con el número de interacciones



Por lo tanto, un conjunto apropiado de parámetros para el algoritmo ACO que permita encontrar los valores óptimos de transición, se define como 20 hormigas y 60 interacciones; bajo estas condiciones se ejecuta el procedimiento ACO diseñado y se obtiene un plan de transición de nueve períodos. La Tabla 14 muestra el plan transición para nueve (9) períodos o etapas de transición siguiendo lo descrito en las secciones 5.2 y 5.3.

| Numero de Períodos o Pasos | Intersección | Tiempo de Verde por Movimiento | | | | | | | | Tamaño del Ciclo | Desfase |
|----------------------------|--------------|--------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------------------|---------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | | |
| | | WBL | EBT | NBL | SBT | EBL | WBT | SBL | NBT | | |
| Antes | 1 | 13 | 20 | 9 | 23 | 13 | 20 | 8 | 24 | 65 | 31 |
| | 2 | 11 | 22 | 9 | 23 | 13 | 20 | 9 | 23 | 65 | 0 |
| | 3 | 10 | 24 | 9 | 22 | 14 | 20 | 8 | 23 | 65 | 31 |
| 1 | 1 | 15 | 21 | 9 | 25 | 13 | 23 | 8 | 26 | 66 | 31 |
| | 2 | 11 | 22 | 9 | 24 | 13 | 20 | 9 | 24 | 66 | 0 |
| | 3 | 11 | 25 | 9 | 26 | 14 | 22 | 8 | 27 | 66 | 31 |
| 2 | 1 | 15 | 22 | 9 | 27 | 14 | 23 | 8 | 27 | 69 | 32 |
| | 2 | 11 | 22 | 9 | 27 | 13 | 20 | 9 | 27 | 68 | 0 |
| | 3 | 13 | 25 | 9 | 27 | 14 | 24 | 9 | 27 | 69 | 32 |
| 3 | 1 | 18 | 25 | 10 | 31 | 15 | 29 | 9 | 31 | 73 | 33 |
| | 2 | 13 | 26 | 10 | 30 | 15 | 25 | 9 | 30 | 71 | 0 |
| | 3 | 14 | 28 | 10 | 30 | 17 | 26 | 9 | 30 | 73 | 33 |
| 4 | 1 | 18 | 25 | 10 | 33 | 15 | 29 | 9 | 33 | 77 | 34 |
| | 2 | 15 | 26 | 10 | 30 | 16 | 25 | 10 | 30 | 74 | 0 |
| | 3 | 16 | 28 | 11 | 32 | 18 | 27 | 10 | 32 | 77 | 34 |
| 5 | 1 | 22 | 26 | 11 | 32 | 16 | 32 | 10 | 33 | 82 | 35 |
| | 2 | 19 | 29 | 11 | 31 | 17 | 31 | 11 | 31 | 78 | 0 |
| | 3 | 16 | 32 | 11 | 34 | 18 | 31 | 10 | 34 | 82 | 35 |
| 6 | 1 | 23 | 27 | 11 | 35 | 16 | 35 | 11 | 34 | 89 | 37 |
| | 2 | 19 | 31 | 11 | 34 | 18 | 32 | 11 | 34 | 83 | 0 |
| | 3 | 17 | 33 | 11 | 37 | 19 | 30 | 11 | 38 | 89 | 37 |
| 7 | 1 | 25 | 30 | 11 | 39 | 16 | 38 | 12 | 39 | 101 | 40 |
| | 2 | 19 | 31 | 11 | 37 | 18 | 32 | 11 | 37 | 92 | 0 |
| | 3 | 21 | 33 | 11 | 40 | 20 | 33 | 12 | 40 | 101 | 40 |
| 8 | 1 | 26 | 30 | 11 | 42 | 17 | 40 | 12 | 40 | 115 | 44 |
| | 2 | 19 | 31 | 11 | 37 | 18 | 32 | 11 | 37 | 102 | 0 |
| | 3 | 21 | 35 | 11 | 42 | 20 | 34 | 12 | 43 | 115 | 44 |
| Después | 1 | 29 | 31 | 11 | 44 | 17 | 43 | 13 | 42 | 115 | 69 |
| | 2 | 23 | 35 | 12 | 45 | 20 | 38 | 13 | 44 | 115 | 0 |
| | 3 | 21 | 38 | 11 | 45 | 22 | 36 | 12 | 45 | 115 | 69 |

Tabla 14. Plan de transición óptimo



Por otra parte, para definir la eficacia y el impacto sobre el medio ambiente y usuarios de este nuevo enfoque se lleva a cabo una simulación, utilizando AIMSUN 8.1, para comparar el plan de transición propuesto (Tabla 14) con los métodos tradicionales, como por ejemplo, inmediato, dos y tres ciclos.

El resultado obtenido en la simulación para el escenario definido con el plan de transición propuesto y obtenido según algoritmo ACO es 778,20 dólares para los costos de tiempo, 91,3 para los costos de operación por vehículo y \$ US 9,50 por el costo de emisiones al aire de CO, HC, y NOx. Para un total de 870 dólares por concepto de los costos sociales. De igual forma para este escenario el retraso medio o demora por vehículo cuando se produce la transición en nueve pasos es 25,82 segundos / vehículo.

La Tabla 15 muestra las comparaciones numéricas entre los diferentes planes de transición obtenidos: método propuesto, obtenido a partir del modelo matemático y optimizado usando algoritmo ACO, transición inmediata, transición dos ciclos y transición tres ciclos.

| Método de transición | Costo Social | | Costo valor del tiempo | | Costo operación vehículo | | Costo emisión de gases | | Demora o retardo | |
|-----------------------|--------------|-----|------------------------|-----|--------------------------|-----|------------------------|-----|------------------|----|
| | US \$ | % | US \$ | % | US \$ | % | US \$ | % | Seg/veh | % |
| Propuesto(ACO) | 930,4 | – | 778,2 | – | 129,85 | – | 22,41 | – | 25,82 | – |
| Inmediato | 1195,8 | 22% | 1006,6 | 23% | 160,58 | 19% | 28,66 | 22% | 27,19 | 5% |
| Dos Ciclos | 1173,0 | 21% | 987,7 | 21% | 157,32 | 17% | 27,99 | 20% | 27,00 | 4% |
| Tres Ciclos | 1182,7 | 21% | 996,6 | 22% | 158,10 | 18% | 28,02 | 20% | 27,21 | 5% |

Tabla 15. Resultados simulación para diferentes escenarios de transición para el caso de estudio

Como se puede observar en los resultados detallados en la Tabla 15, para todos los casos el método propuesto mostró mejores medidas de rendimiento, obteniendo mejoras alrededor de 22% en los costos sociales y del 5% en la demora. Seguido por el método de dos ciclos, que presenta buenos desempeños.



Capítulo 6

DISEÑO DE UN PLAN DE TRANSICIÓN ENTRE PLANES DE SEMÁFOROS CASO CORREDOR GENERAL DÁVILA





6. DISEÑO DE UN PLAN DE TRANSICIÓN ENTRE PLANES DE SEMAFORO: Caso Paseo General Dávila de la ciudad de Santander

Durante la última década, la Unión Europea ha enfrentado un rápido aumento en el transporte motorizado, basado en el crecimiento del parque automotor, lo que ha llevado a incrementos en la congestión y en el estrés urbano, que inciden en problemas de bienestar ciudadano, salud ambiental y detrimentos económicos. Como resultado surge la necesidad de modelos y políticas innovadoras y eficientes que pivoteen hacia un sector de transporte con criterios de sostenibilidad ambiental, económica y social.

El objetivo de esta capítulo es evaluar el desempeño del modelo matemático propuesto en el capítulo 5, mediante el diseño de un plan de transición para una arteria semaforizada de la ciudad de Santander. La evaluación de la validez y utilidad del modelo se basara en su capacidad para reducir al mínimo los retardos, las emisiones de contaminación del aire y el consumo de combustible y su eficacia para reducir los costos sociales asociados con el período de transición.



6.1. Introducción

El rápido crecimiento en la economía y como consecuencia el aumento del transporte motorizado ha generado problemas de movilidad tanto para vehículos como para peatones, debido a que las demandas superan las capacidades de la infraestructuras, generando así, el fenómeno conocido como congestión que trae consigo problemas tales como el consumo de combustible, las emisiones de gases de efecto invernadero y la demora para los usuarios de los sistemas de transporte, entre otros.

Para los estados de la Unión Europea, se estima que el costo por congestión está en el orden de los \$110 billones de euros al año, con demoras promedios en las vías urbanas de 16,6 segundos por kilómetro y solo el sector transporte contribuye con el 25% de las emisiones totales de gases de efecto invernadero en Europa, este problema es más grave para países como Irlanda, Reino Unido, Polonia y Hungría (MOVE, 2014).

En el caso de España aunque los niveles de congestión son más reducidos que otros países de Europa, las cifras son considerables y la congestión un problema a mejorar. Más del 5% de la red vial sufre retrasos mayores de 12 segundos por km, concentrados principalmente en Madrid y Barcelona y demás ciudades principales. Los conductores y pasajeros en España gastan cerca de 420 millones de horas al año en la congestión, con un costo anual estimado en más de \$5,5 millones de euros por año (Christidis & Rivas, 2012).

Desde el punto de vista ambiental las cifras también son poco alentadoras, la emisión de gases efecto invernadero a la atmosfera procedentes del sector transporte, aumento su nivel de concentración a un máximo sin precedentes en el año 2013, creciendo en un 56,8 % por encima que lo registrado en 1990 y sobrepasando las cifras fijadas en el protocolo de Kioto. Actualmente la contaminación atmosférica de las ciudades y áreas urbanas proviene del uso del automóvil privado, el cual consume cuatro veces más combustible por cada pasajero que un autobús. Los automóviles en España son responsables del 62% de las emisiones de CO₂, del 80% de las emisiones de NO_x y del 60% de las emisiones de material particulado (Observatorio de la Sostenibilidad en España, 2014).



Teniendo en cuenta las cifras anteriores el sector transporte en España enfrenta un gran desafío, para el diseño de una movilidad sostenible que satisfaga las exigencias ambientales, económicas y sociales. Lo que requiere un sistema de transporte robusto que se adapte a las necesidades de la sociedad y el medio ambiente y que garanticen el movimiento de las personas de una forma eficiente, económica y segura.

El ayuntamiento de la ciudad de Santander contempla dentro de sus planes estratégicos de desarrollo, minimizar los efectos negativos de la movilidad urbana, mediante el diseño, el desarrollo y la implementación de planes, programas y actuaciones de mejora de la movilidad urbana con criterios de sostenibilidad. Contemplando dentro de sus objetivos: 1) Garantizar las mejores condiciones en la movilidad de las personas. 2) Mejorar la calidad de vida en la ciudad, promocionando modos de transporte que disminuya los índices de contaminación ambiental derivados del transporte (FEMP, 2013; G.I.S.T., 2013). Lo anterior sin olvidar que esto se logra con infraestructura vial, tecnológica y de servicios que permitan que los diferentes medios de transporte comprometidos con la sostenibilidad sean rápidos, eficientes y efectivos.

En este orden de ideas en este capítulo se presenta el modelo planteado en esta investigación, como una alternativa para mitigar los problemas de la congestión y contribuir a través del uso de la modelística matemática en el desarrollo de sistemas de señales de tráfico semaforizadas flexibles que permitan la gestión mejorada del tráfico en tiempo real y que integren el componente ambiental con el componente social.

Para esto se identificará una red de intersecciones semaforizadas en la ciudad de Santander mediante la cual se evaluará la validez y utilidad del modelo propuesto. Esta evaluación se basará, dadas unas condiciones actuales y un escenario propuesto, en la capacidad para reducir al mínimo los retardos o demoras, las emisiones de contaminación del aire y el consumo de combustible y su eficacia para reducir los costos sociales asociados con el período de transición.

Para este caso de estudio se escogió trabajar con la red semafórica del Paseo General Dávila, comprendida desde la Calle Francisco Palazuelos hasta la Calle Vasquez de



Mella, incluyendo dentro del estudio el cruce entre el Paseo General Dávila y la Calle Alonso Vega en el tramo de Bajada Sanjuan. Lo anterior debido al incremento en los niveles de tráfico que esta zona está presentando principalmente en las horas picos.

A continuación se presenta en detalle la aplicación práctica del modelo propuesto para el caso de estudio en la ciudad de Santander.

6.2. Situación actual red semafórica en estudio

La aplicación práctica de esta investigación se centra en el desarrollo de un plan de transición para el cambio en los tiempos de repartos de los semáforos entre dos periodos del día, basado en la metodología propuesta, para un tramo de la red semafórica del Paseo General Dávila en la ciudad de Santander. A continuación se plantean una serie de características de la red en estudio con el fin de comprender lo mejor posible la situación actual sobre la cual se plantea y evalúa el modelo propuesto.

6.2.1. Situación y emplazamiento

El caso de estudio se sitúa en la ciudad de Santander, capital de la Comunidad Autónoma de Cantabria. Se encuentra situada al norte de la misma; estando, a su vez, enmarcada en la zona septentrional de la Península Ibérica conocida como Región Cantábrica ver Figura 27.

Según el Padrón Municipal Cantabria 2012, el municipio de Santander se establece como el núcleo central de la provincia con una superficie de 34,76 km², que constituye menos del 1% de la superficie de la región. La población actual es de 178.465 habitantes, es decir el 30,05% de la población con respecto al total de la provincia Cantábrica (Instituto Cántabro de Estadística, 2013). La mayor concentración de la población se encuentra principalmente en el centro de la ciudad y zonas aledañas ver Figura 28.

La morfología de la ciudad, se caracteriza por una alternancia de pendientes y depresiones paralelas en dirección noroeste-sureste. La zona llana se localiza principalmente en la parte sur de la ciudad y se debe a los rellenos alrededor de la bahía con el objetivo de ganar terreno al mar. Esta situación influye en la malla vial de la ciudad con un eje principal que conecta los extremos de la ciudad desde la zona de

Valdecilla hasta el Sardinero. Paralela a esta red se encuentra una red que da acceso a la zona marítima desde la calle Castilla hasta Márquez de Hermida.



Figura 27. Situación del término municipal de Santander.
(Fuente: PGOU de Santander).

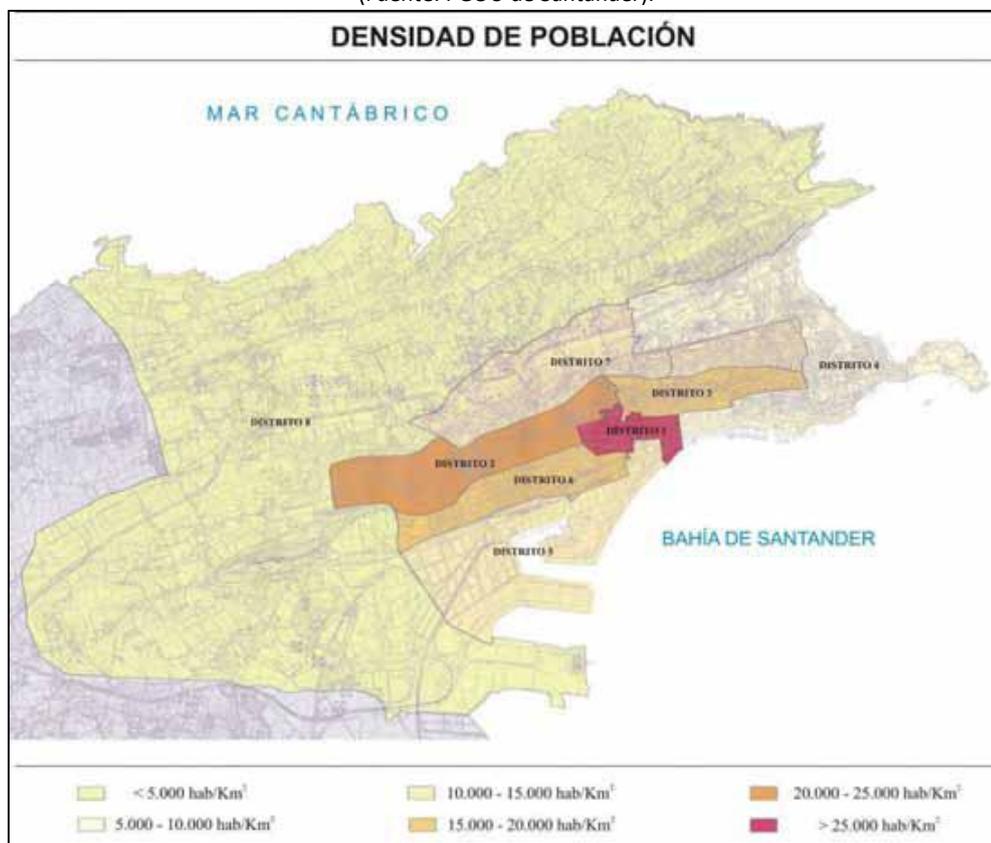


Figura 28. Densidad de población en los distritos del municipio de Santander.
(Fuente: PGOU de Santander).



Sobre una loma paralela a la línea de la costa se encuentra el paseo de General Dávila, también eje principal en la parte alta de la ciudad, y por ultimo una autovía urbana que avanza hasta al área de El Sardinero, por la Avenida de los Castros (Ayuntamiento de Santander, 2010).

Al igual que en España y otros países el principal modo de transporte de la población activa, para desplazarse por la ciudad, es el vehículo privado, a esto hay que agregar el desplazamientos de las personas que trabajan o estudian y que residen fuera de la ciudad y entran y salen a diario en las horas de más congestión. En el caso particular de Santander, los desplazamientos en bus y a pie también tienen un porcentaje importante dentro de la movilidad urbana, como se puede observar en la figura 29.

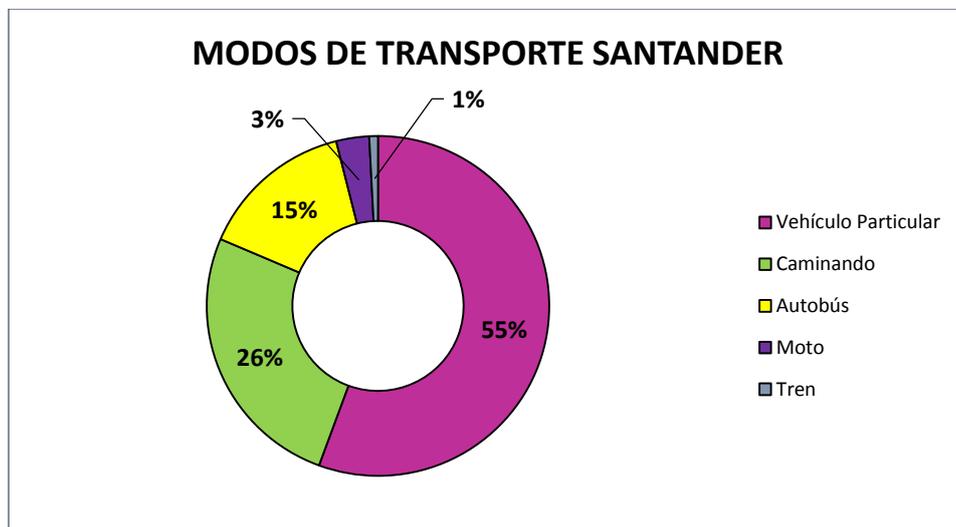


Figura 29. Modos de transporte para la población activa de la ciudad de Santander.

Con respecto a el transporte público de Santander lo constituyen 18 líneas, que dan servicio a la toda la ciudad; 6 de estas líneas son circulares (5C1, 5C2, 6C1, 6C2, 7C1 y 7C2). Además cuenta con 3 líneas de servicio nocturno que funcionan los viernes y los sábados. La Figura 30 muestra el conjunto de líneas de transporte público de ciudad de Santander.

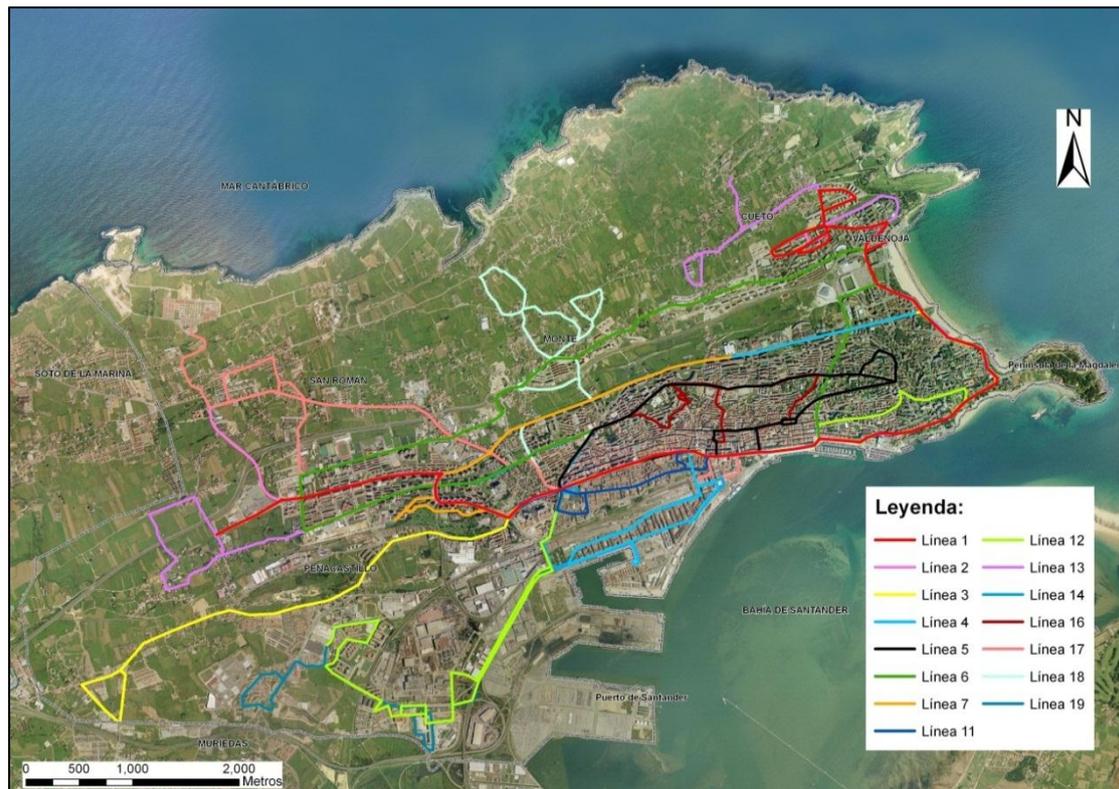


Figura 30. Mapa de líneas de la ciudad de Santander.
Fuente: (Collantes, 2011)

6.2.2. Red semafórica en estudio

En la ciudad de Santander, el fenómeno de la congestión no se da con la misma gravedad que en otras ciudades principales de España. Aun así, uno de los primordiales retos para las autoridades y académicos de la ciudad es trabajar para mejorar las necesidades en materia de movilidad identificando los principales cuellos de botella de las respectivas redes viales urbanas, en búsqueda de soluciones que mitiguen los efectos de la congestión.

Es por esto, que para este caso de estudio se identificó una de la redes viales de la ciudad con mayor niveles de tráfico durante las horas picos y cuyo diseño imposibilita por el momento mejoras estructurales. Así, la aplicación práctica del modelo planteado, se realizara en la red semafórica del Paseo General Dávila, comprendida desde la Calle Francisco Palazuelos hasta la Calle Vasquez de Mella, incluyendo dentro del estudio el cruce entre el Paseo General Dávila y la Calle Alonso Vega hasta el tramo de Bajada Sanjuan (ver Figura 31).



Figura 31. Delimitación red caso de estudio: Paseo General Dávila.

Este tramo de red consta de 12 cruces o intersecciones semaforizadas (ver Figura 32) y se encuentra enmarcado dentro de la sub-área 101 definida por el centro del control de tráfico de la ciudad de Santander. La Tabla 16 describe las ubicaciones para cada uno de los nodos o cruces de la sub-área 101 a considerar en este estudio.

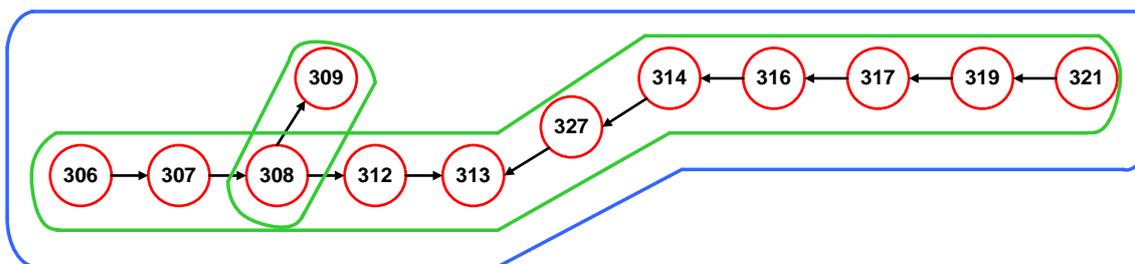


Figura 32. Cruces en estudio red semafórica Paseo General Dávila.

La programación semafórica en esta red vial se hace según el flujo vehicular durante los diferentes periodos del día. El centro de control de tráfico definió para este tramo 5 planes de reparto (21, 31, 33, 41 y 51) para cada intersección semaforizada los cuales se programan para un día típico según los horarios establecidos en Tabla 17, respondiendo las demandas del tráfico en cada uno de los horarios establecidos.



| Cruce No. | Ubicación Instalación Semafórica |
|------------------|---|
| 3210 | Paseo General Dávila-Francisco Palazuelos |
| 3190 | Paseo General Dávila-La antenas |
| 3170 | Paseo General Dávila-J. Martinez Maza |
| 3160 | Paseo General Dávila-Bajada de Polio-Cuesta de la Atalaya |
| 3140 | Paseo General Dávila-Vía Cornelia |
| 3270 | Paseo General Dávila-Conservatorio de Música |
| 3130 | Paseo General Dávila-Monte |
| 3120 | Paseo General Dávila-Colegio Mercedarias |
| 3080 | Paseo General Dávila-Camilo Alonso Vega |
| 3090 | Camilo Alonso Vega-Bajada San Juan |
| 3070 | Paseo General Dávila-Grupo San Francisco |
| 3060 | Paseo General Dávila-Vázquez de Mella |

Tabla 16. Ubicación cruces en el tramo en estudio.

El cambio de estos planes o transición se realiza de forma inmediata, es decir no se toman medidas para suavizar el cambio sino que se realiza en las horas establecidas implementándose rápidamente el nuevo plan.

| Número de la Sub-área | Número del Plan | Hora Inicial de entrada del Plan | Minuto inicial del Plan |
|------------------------------|------------------------|---|--------------------------------|
| 101 | 31 | 7 | 0 |
| 101 | 51 | 8 | 15 |
| 101 | 41 | 9 | 30 |
| 101 | 31 | 10 | 0 |
| 101 | 51 | 12 | 45 |
| 101 | 31 | 14 | 45 |
| 101 | 41 | 16 | 45 |
| 101 | 51 | 17 | 0 |
| 101 | 33 | 21 | 0 |
| 101 | 21 | 23 | 0 |

Tabla 17. Lista horaria de planes para la sub-área 101

Es importante también destacar que por el tramo de vía en estudio transitan a lo largo de toda su longitud, dos líneas de transporte público urbano: la 5C1 y la 5C2, las cuales son líneas circulares que comunican la parte alta de la ciudad con el centro. Por otro lado se encuentra la línea 16 que cumple con la misma función pero de forma transversal.

6.2.3. Planes de reparto actual

Las concentraciones más altas de flujo vehicular y por ende la congestión para el paseo General Dávila ocurre durante las horas de la mañana o en horas de la tarde, con el



movimiento de trabajadores y estudiantes desde sus hogares hacia sus áreas de trabajo, escuelas y universidades o viceversa. Teniendo en cuenta lo anterior para este estudio se identificó el período del día sobre el cual mejoras en la implementación y funcionamiento de la transición pudieran llevar al mayor número de efectos positivos. Luego de un análisis, se definió que las horas donde se pasa de un flujo vehicular bajo a uno muy alto, causando gran congestión en la vía es el período comprendido entre las 7:00 a.m. a las 9:30 a.m.; antes de las 8:00 a.m. se viene de un período con un volumen de tráfico bajo pero entre 8:00 a.m. y 9:00 a.m. se incrementa considerablemente el movimiento por la zona debido a la entrada de los colegios y desplazamientos a los lugares de trabajo. Por esta razón la aplicación práctica del modelo diseñado se realizara en el periodo comprendido entre las 7:15 hasta las 9:15 de la mañana. Donde los planes que se utilizan para este periodo son los 31 y 51, presentándose el respectivo cambio exactamente a las 8:15 de la mañana.

Según datos suministrados por el centro de control de tráfico los tiempos de los semáforos para los planes 31 y 51 para cada uno de los cruces del tramo del paseo General Dávila en estudio se describen en las Tablas 18-20.

Los planes de reparto para el tramo de intersecciones comprendido entre el cruce no. 3080 al cruce no. 3060 se describen en la Tabla 18.

| Fase | 3210 | | Fase | 3190 | |
|---------------|---------|---------|---------------|---------|---------|
| | Plan 31 | Plan 51 | | Plan 31 | Plan 51 |
| 1 | 77 | 97 | 1 | 74 | 94 |
| 2 | 3 | 3 | 2 | 16 | 16 |
| 3 | 10 | 10 | 3 | - | - |
| 4 | - | - | 4 | - | - |
| Ciclo | 90 | 110 | Ciclo | 90 | 110 |
| Offset | 0 | 4 | Offset | 0 | 5 |

| Fase | 3170 | | Fase | 3160 | |
|---------------|---------|---------|---------------|---------|---------|
| | Plan 31 | Plan 51 | | Plan 31 | Plan 51 |
| 1 | 12 | 12 | 1 | 47 | 64 |
| 2 | 62 | 82 | 2 | 15 | 17 |
| 3 | 16 | 16 | 3 | 17 | 17 |
| 4 | - | - | 4 | 11 | 12 |
| Ciclo | 90 | 110 | Ciclo | 90 | 110 |
| Offset | 0 | 4 | Offset | 15 | 5 |

Tabla 18. Planes de reparto actual para los cruces 3210-3190-3170-3160



Los planes de reparto para el tramo de intersecciones comprendidos entre el cruce no. 3140 al cruce no. 3120 se muestran en la Tabla 19.

| Fase | 3140 | | Fase | 3270 | |
|---------------|---------|---------|---------------|---------|---------|
| | Plan 31 | Plan 51 | | Plan 31 | Plan 51 |
| 1 | 58 | 78 | 1 | 62 | 82 |
| 2 | 16 | 16 | 2 | 16 | 16 |
| 3 | 16 | 16 | 3 | 12 | 12 |
| 4 | - | - | 4 | - | - |
| Ciclo | 90 | 110 | Ciclo | 90 | 110 |
| Offset | 0 | 5 | Offset | 0 | 1 |

| Fase | 3130 | | Fase | 3120 | |
|---------------|---------|---------|---------------|---------|---------|
| | Plan 31 | Plan 51 | | Plan 31 | Plan 51 |
| 1 | 69 | 89 | 1 | 74 | 88 |
| 2 | 3 | 3 | 2 | 16 | 22 |
| 3 | 15 | 15 | 3 | - | - |
| 4 | 3 | 3 | 4 | - | - |
| Ciclo | 90 | 110 | Ciclo | 90 | 110 |
| Offset | 35 | 4 | Offset | 35 | 1 |

Tabla 19. Planes de reparto actual para los cruces 3140-3270-3130-3120

Los planes de reparto para el tramo de intersecciones comprendidos entre el cruce no. 3080 al cruce no. 3060 se describen en la Tabla 20.

| Fase | 3080 | | Fase | 3090 | |
|---------------|---------|---------|---------------|---------|---------|
| | Plan 31 | Plan 51 | | Plan 31 | Plan 51 |
| 1 | 35 | 30 | 1 | 58 | 75 |
| 2 | 10 | 10 | 2 | 22 | 25 |
| 3 | 45 | 70 | 3 | 10 | 10 |
| 4 | - | - | 4 | - | - |
| Ciclo | 90 | 110 | Ciclo | 90 | 110 |
| Offset | 0 | 4 | Offset | 17 | 4 |

| Fase | 3070 | | Fase | 3060 | |
|---------------|---------|---------|---------------|---------|---------|
| | Plan 31 | Plan 51 | | Plan 31 | Plan 51 |
| 1 | 74 | 94 | 1 | 62 | 82 |
| 2 | 16 | 16 | 2 | 16 | 16 |
| 3 | - | - | 3 | 12 | 12 |
| 4 | - | - | 4 | - | - |
| Ciclo | 90 | 110 | Ciclo | 90 | 110 |
| Offset | 35 | 57 | Offset | 54 | 86 |

Tabla 20. Planes de reparto actual para los cruces 3080-3090-3070-3060



Como se puede observar en las tablas 18-20 los tiempos de reparto están definidos por hasta 4 fases que involucran los diferentes movimientos asociados, incluyendo los pasos de peatones. La Figura 33 muestra un ejemplo de los movimientos asociados a las fases para la intersección o cruce no. 3080

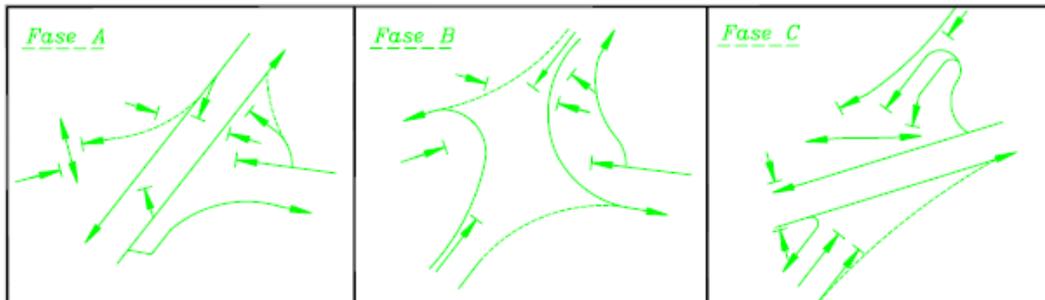


Figura 33. Movimientos asociados a cada fase para la intersección 3080.

6.2.4. Simulación red semafórica actual

Una vez definido el tramo en estudio y las condiciones de semaforización para cada una de las intersecciones que lo componen, una simulación es necesaria para plasmar las condiciones actuales y las propuestas; y con base en estas establecer las diferentes comparaciones que permitan evaluar la efectividad y validez del modelo propuesto.

La simulación se realizara en un escenario de microsimulación utilizando la herramienta informática AIMSUN versión 8.10.

Para esto, el primer paso consiste en construir y dibujar la red con base en la información y planos suministrados por el centro de control de tráfico, así como la información geográfica obtenida a través de la aplicación Google Earth. Cada una de las 12 intersecciones fue dibujada al detalle manteniendo las condiciones de geometría y capacidad de las mismas. Las Figuras 33 y 34 muestran tramos parciales de la red dibujada.

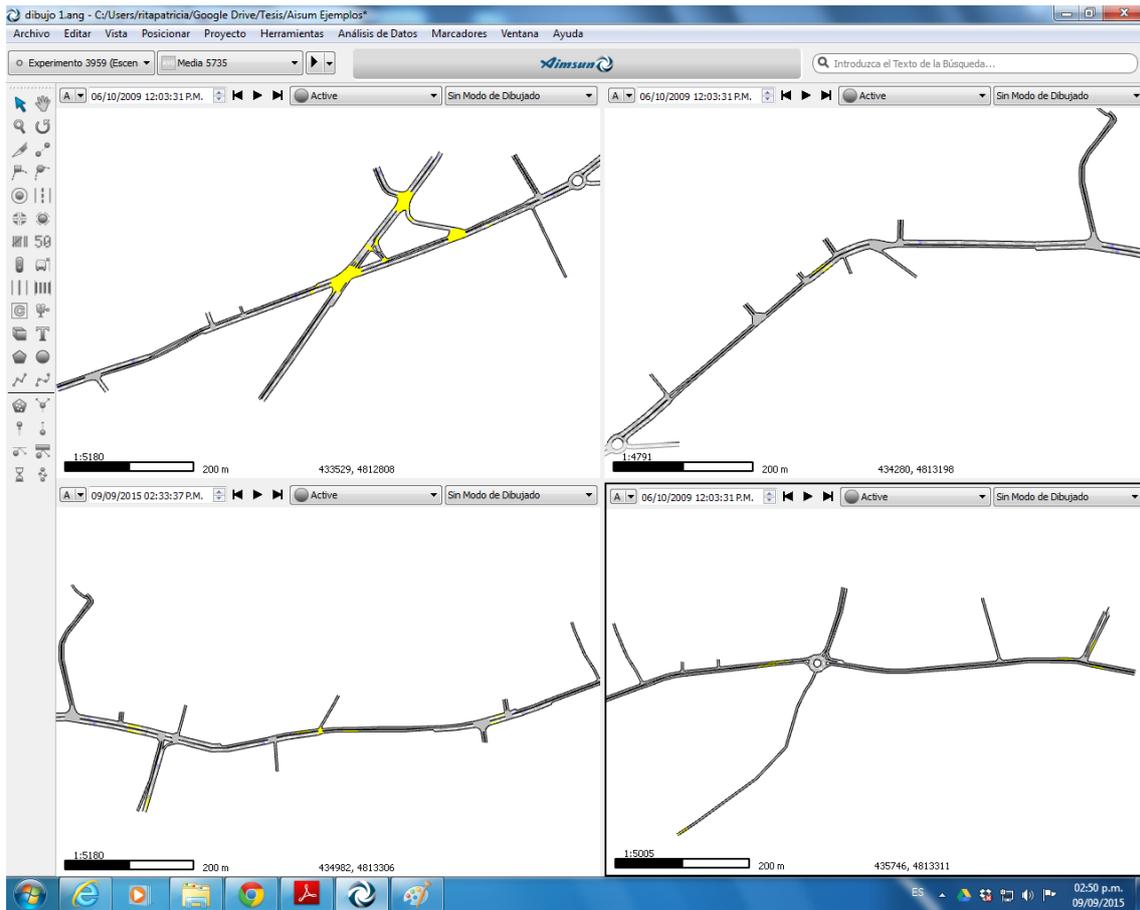


Figura 34. Vistas de tramos parciales red Paseo General Dávila.

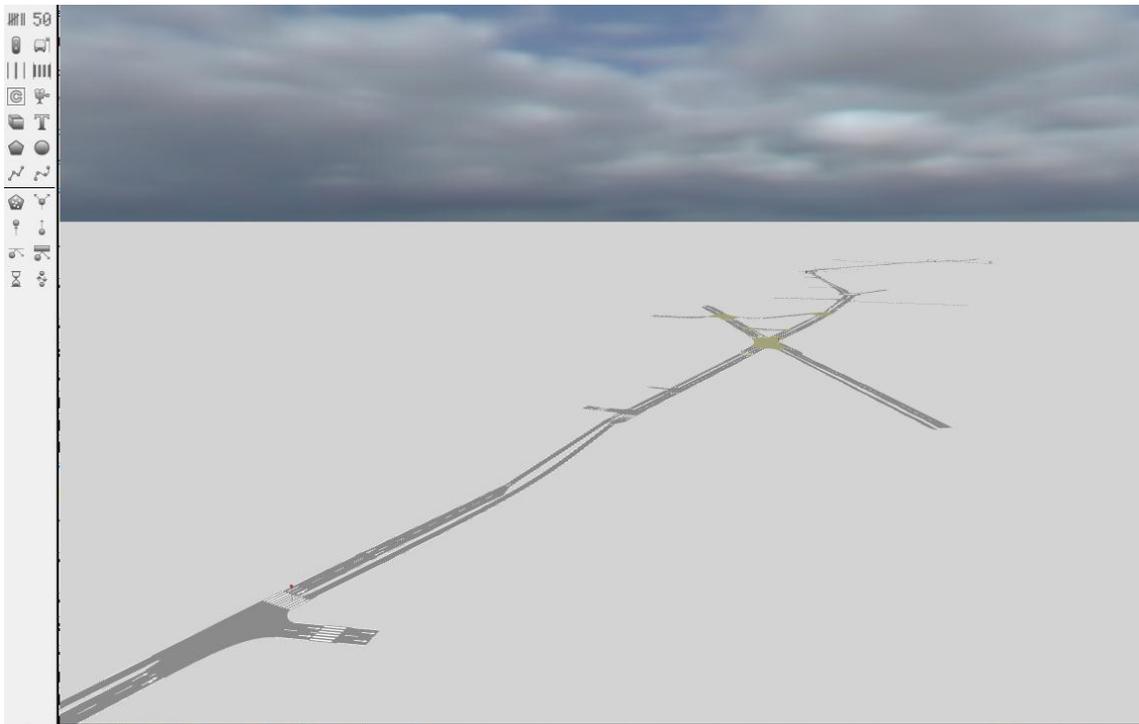


Figura 35. Vista 3D tramo parcial red Paseo General Dávila.



Dibujada la red, es necesario alimentar con datos el proyecto de simulación creado, para lo que se procede a definir para cada intersección los tiempos de reparto establecidos en la tablas 18-20, creando así dos planes uno para antes de la transición o plan 31 y otro para después de la transición o plan 51. Con estos planes creados se procede a establecer el plan de control maestro encargado de poner en funcionamiento el plan de acuerdo al horario o periodo del día. Así, el plan 31 estará asociado a un plan maestro que operara de 7:15 a.m. a 8:14 a.m. y el plan 51 funcionara en un plan maestro definido para el periodo comprendido entre las 8:15 a.m. a 9:15 a.m.

También es necesario definir los tipos de vehículos que harán parte de la simulación para lo que se establece el uso del coche liviano o particular y también el uso de transporte público o bus y minibus.

Como se dijo anteriormente, por Paseo General Dávila circulan 3 líneas de buses, estas son la 5C1, 5C2 y 16. Se crean entonces las paradas, horarios y recorrido asociado a cada una de estas, y a partir de ahí se define el plan de transporte público asociado a la red en estudio.

El último paso necesario para construir los posibles escenarios de simulación, consiste en definir la demanda de tráfico, es decir el volumen o flujo vehicular asociado a los periodos de tiempo para el análisis de la red. Aquí es necesario obtener una matriz de demanda origen destino para el periodo comprendido entre 7:15 a.m. y 8:14 a.m. (antes de la transición) y el periodo comprendido entre 8:15 a.m. a 9:15 a.m. (después de la transición). Para esto fue necesario hacer un inventario de las espiras colocadas a lo largo de la red vial para así obtener información en tiempo real del flujo de tráfico en cada zona que hace parte del estudio. Se identificaron 28 espiras a lo largo del corredor las cuales se relacionan en la Tabla 21.

Definidas las espiras se recopila información de los volúmenes de tráficos que estas registraron durante el mes de mayo de 2014 en el periodo comprendido entre las 7:15 a.m. y 9:15 a.m.; esta información se recopila cada 15 minutos de este periodo de tiempo durante todo el mes, para luego promediar y obtener datos de la demanda cada quince minutos.



| ID espiras General Dávila | |
|---------------------------|------|
| 3008 | 3028 |
| 3009 | 3031 |
| 3010 | 3032 |
| 3011 | 3041 |
| 3012 | 3050 |
| 3013 | 3051 |
| 3014 | 3052 |
| 3018 | 3053 |
| 3019 | 3054 |
| 3020 | 3059 |
| 3021 | 3060 |
| 3022 | 3061 |
| 3025 | 3065 |
| 3026 | 3067 |

Tabla 21. ID espiras General Dávila

Se establecieron los centroides a partir de los cuales se va a generar la demanda teniendo en cuenta las características del área de estudio y con la información promediada se crean escenarios de ajustes macros para cada 15 minutos del periodo en estudio.

Con los datos reales obtenidos a partir de la información obtenida de las espiras se realizan simulaciones en un escenario de ajuste macro con el fin de generar datos de la demanda ajustados a los datos reales cada 15 minutos durante el período de estudio.

Obtenida la demanda ajustada para cada intervalo se procede a definir la demanda para el periodo antes de la transición y para el periodo después de la transición.

Ya con la red construida y los datos definidos es necesario calibrar el modelo de simulación y verificar que corresponda a las condiciones reales, se procedió a la calibración de la red y a realizar los ajustes que garantizan su grado de fidelidad con las condiciones reales. Las figuras 36 y 37 muestran el grado de coherencia de los datos simulados con los datos reales, evidenciado un buen grado de ajuste con coeficiente R^2 de 0,988.

Con el modelo calibrado se cuenta con las condiciones necesarias para definir los diferentes escenarios que permitan simular tanto la situación actual como la situación propuesta.

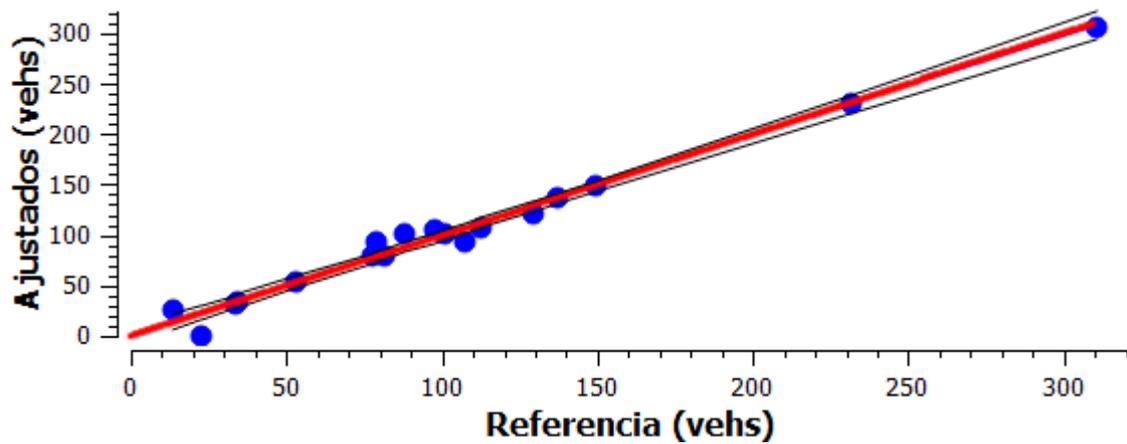


Figura 36. Recta de regresión prueba de ajustes datos de la demanda.

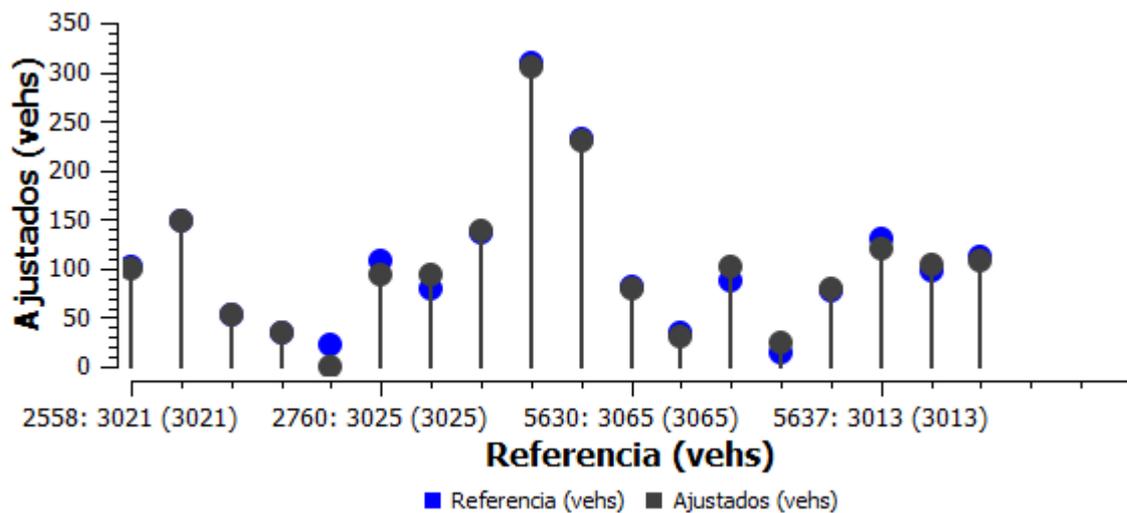


Figura 37. Relación demanda datos reales con datos ajustados.

6.3. Optimización de los planes de reparto de los semáforos antes y después de la transición

Una de los principales requerimientos al momento de definir un plan de transición es que los planes de reparto para los periodos antes y después respondan a las condiciones de tráfico para el momento de análisis; es por esto que se requiere comprobar o definir la optimización de los mismos.

Así para el caso de estudio, se optimizaran los planes de reparto suministrados por el centro de control de tráfico, pero como la herramienta AIMSUN no cuenta con optimizador de señales de tráfico, es necesario hacer este procedimiento mediante el uso de la herramienta de optimización SYNCHRO en su versión 8.0. Para este efecto



fue necesario dibujar la red al detalle y alimentar la herramienta con los planes iniciales y la demanda ajustada obtenida a través del *software* de simulación AIMSUN, la Figura 38 muestra la red en SYNCHRO para el caso de estudio.

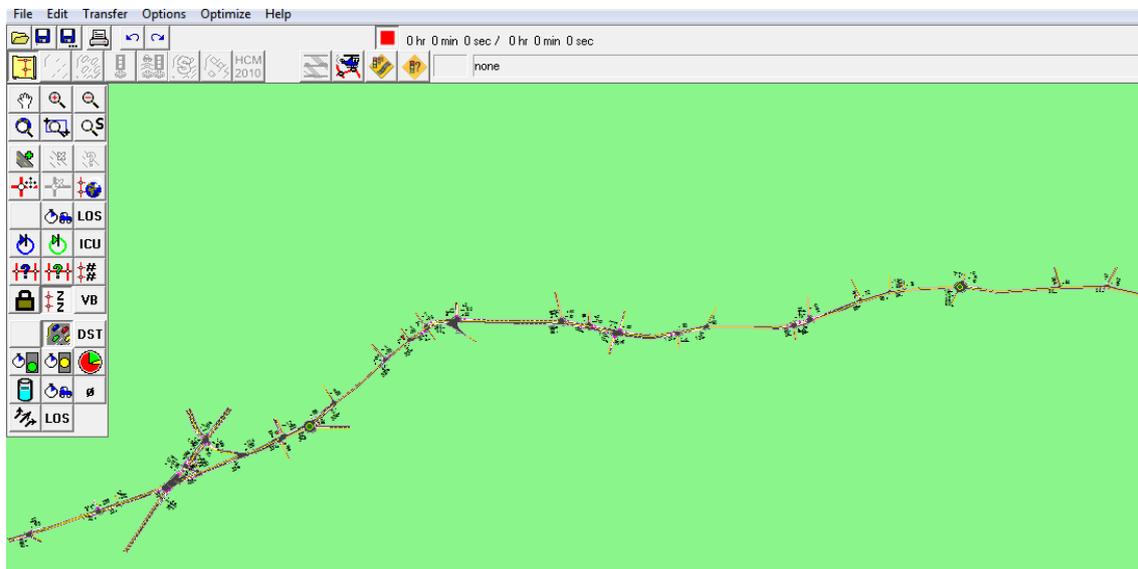


Figura 38. Red en SYNCHRO Paseo General Dávila.

El primer paso consistió en la optimización de la longitud de ciclo, esta se realiza tomando como medida de desempeño la demora o retardo promedio por vehículo, y definiendo que se garantice la coordinación para todas las intersecciones.

El anterior proceso es desarrollado para los dos planes en estudio: 31 (período antes de la transición) y 51 (período después de la transición). En este proceso el tamaño de ciclo óptimo fue 80 y 100 segundos para el plan antes y el plan después respectivamente. Después del análisis de las fases diseñadas para la intersecciones en estudio y teniendo en cuenta que en todas existe una fase exclusiva para peatones, lo cual no se puede configurar en SYNCHRO, se tomó como ciclo optimo el inmediatamente superior para de esta forma no penalizar los movimientos de automóviles y por ende la medida de desempeño del sistema. Así el ciclo óptimo para el plan 31 quedo definido como 90 segundos y para el plan 51 el largo de ciclo quedo en 110. La figura 39 muestra los resultados del ciclo óptimo generado por el *software* para el plan antes (31).

Una vez definido los tamaños de ciclo optimo se configura en la herramienta la optimización de la red completa (tiempos de reparto) y del *offset*.

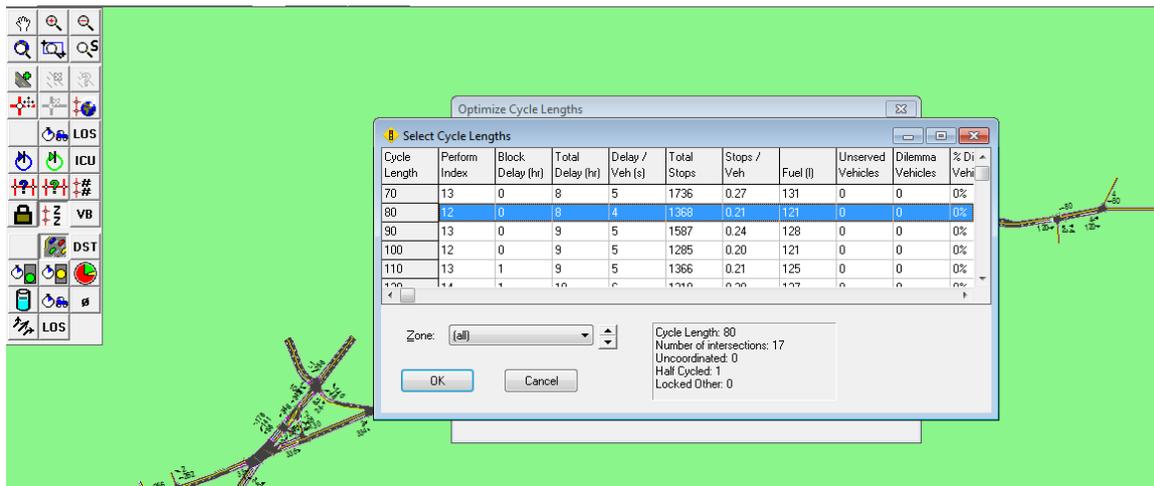


Figura 39. Optimización en SYNCHRO plan de repartos 31 para Paseo General Dávila.

Realizada las optimizaciones, SYNCHRO genera el reporte para los planes de semaforización para la red. Analizando los tiempos de reparto óptimos se concluye que la optimización en general beneficia los movimientos de algunas de las calles secundarias. Las Tablas 22 y 23 muestran los resultados de los tiempos de repartos óptimos para los nodos de la red en estudio.

| Fase | 3210 | |
|---------------|----------------|----------------|
| | Plan 31 óptimo | Plan 51 óptimo |
| 1 | 75 | 95 |
| 2 | 3 | 3 |
| 3 | 12 | 12 |
| 4 | - | - |
| Ciclo | 90 | 110 |
| Offset | 0 | 3 |

| Fase | 3190 | |
|---------------|----------------|----------------|
| | Plan 31 óptimo | Plan 51 óptimo |
| 1 | 56 | 90 |
| 2 | 34 | 20 |
| 3 | - | - |
| 4 | - | - |
| Ciclo | 90 | 110 |
| Offset | 0 | 5 |

| Fase | 3170 | |
|---------------|----------------|----------------|
| | Plan 31 óptimo | Plan 51 óptimo |
| 1 | 12 | 12 |
| 2 | 49 | 63 |
| 3 | 29 | 35 |
| 4 | - | - |
| Ciclo | 90 | 110 |
| Offset | 0 | 2 |

| Fase | 3160 | |
|---------------|----------------|----------------|
| | Plan 31 óptimo | Plan 51 óptimo |
| 1 | 46 | 64 |
| 2 | 12 | 15 |
| 3 | 12 | 15 |
| 4 | 20 | 16 |
| Ciclo | 90 | 110 |
| Offset | 14 | 5 |

Tabla 22. Planes de reparto optimizados para los cruces 3210-3190-3170-3160



| 3140 | | | 3270 | | |
|---------------|-------------------|-------------------|---------------|-------------------|-------------------|
| Fase | Plan 31 óptimo | Plan 51 óptimo | Fase | Plan 31 óptimo | Plan 51 óptimo |
| 1 | 65 | 77 | 1 | 68 | 82 |
| 2 | 15 | 18 | 2 | 10 | 16 |
| 3 | 12 | 15 | 3 | 12 | 12 |
| 4 | - | - | 4 | - | - |
| Ciclo | 90 | 110 | Ciclo | 90 | 110 |
| Offset | 0 | 5 | Offset | 0 | 1 |

| 3130 | | | 3120 | | |
|---------------|-------------------|-------------------|---------------|-------------------|-------------------|
| Fase | Plan 31 óptimo | Plan 51 óptimo | Fase | Plan 31 óptimo | Plan 51 óptimo |
| 1 | 72 | 89 | 1 | 78 | 90 |
| 2 | 3 | 3 | 2 | 12 | 20 |
| 3 | 12 | 15 | 3 | - | - |
| 4 | 3 | 3 | 4 | - | - |
| Ciclo | 90 | 110 | Ciclo | 90 | 110 |
| Offset | 33 | 4 | Offset | 39 | 3 |

| 3080 | | | 3090 | | |
|---------------|-------------------|-------------------|---------------|-------------------|-------------------|
| Fase | Plan 31 óptimo | Plan 51 óptimo | Fase | Plan 31 óptimo | Plan 51 óptimo |
| 1 | 38 | 45 | 1 | 49 | 70 |
| 2 | 15 | 12 | 2 | 12 | 20 |
| 3 | 37 | 53 | 3 | 29 | 20 |
| 4 | - | - | 4 | - | - |
| Ciclo | 90 | 110 | Ciclo | 90 | 110 |
| Offset | 0 | 4 | Offset | 10 | 4 |

| 3070 | | | 3060 | | |
|---------------|-------------------|-------------------|---------------|-------------------|-------------------|
| Fase | Plan 31 óptimo | Plan 51 óptimo | Fase | Plan 31 óptimo | Plan 51 óptimo |
| 1 | 78 | 95 | 1 | 66 | 83 |
| 2 | 12 | 15 | 2 | 12 | 15 |
| 3 | - | - | 3 | 12 | 12 |
| 4 | - | - | 4 | - | - |
| Ciclo | 90 | 110 | Ciclo | 90 | 90 |
| Offset | 39 | 57 | Offset | 58 | 86 |

Tabla 23. Planes de reparto actual para los cruces 3140-3270-3130-3120-3080-3090-3070-3060

Una vez definidos los tiempos de reparto óptimos para los planes 31 y 51, se procede a evaluar la eficiencia de los mismos mediante la creación de escenarios en AIMSUN que permitan evaluar las medidas de desempeño de los mismos. Para esto se crean cuatro



escenarios de simulación. Uno para el periodo de 7:15-8:14 a.m. evaluando el plan de repartos 31 y otro en ese mismo periodo evaluando el plan 31 optimizado. La Tabla 24 muestra los resultados de la simulación.

| Serie Temporal | PASEO GENERAL DAVILA | | | | Unidades |
|-----------------------------------|----------------------|---------------------|--------------------|---------------------|----------|
| | PLAN 31 ACTUAL | | PLAN 31 OPTIMIZADO | | |
| | Valor | Desviación Estándar | Valor | Desviación Estándar | |
| Flujo - Todo | 1986 | 31,36 | 1951,25 | 57,77 | veh/h |
| Flujo - coche | 1977,25 | 31,37 | 1942,75 | 58 | veh/h |
| Flujo - bus | 4,75 | 0,5 | 4,5 | 0,58 | veh/h |
| Flujo - minibús | 4 | 0 | 4 | 0 | veh/h |
| Número de Paradas - Todo | 0,17 | 0 | 0,14 | 0 | #/veh/km |
| Número de Paradas - coche | 0,17 | 0 | 0,14 | 0 | #/veh/km |
| Número de Paradas - bus | 0,22 | 0,01 | 0,23 | 0,01 | #/veh/km |
| Número Total de Paradas - Todo | 5327,78 | 253,94 | 4380,23 | 207,91 | |
| Número Total de Paradas - coche | 5296,8 | 253,95 | 4348,79 | 208,21 | |
| Número Total de Paradas - bus | 16,83 | 1,57 | 16,49 | 3,01 | |
| Número Total de Paradas - minibús | 14,15 | 1,63 | 14,95 | 0,57 | |
| Tiempo de Demora - Todo | 71,19 | 2,95 | 65,92 | 3,75 | seg/km |
| Tiempo de Demora - coche | 71,34 | 2,96 | 66,02 | 3,77 | seg/km |
| Tiempo de Demora - bus | 43,29 | 4,17 | 47,89 | 4,12 | seg/km |
| Tiempo de Demora - minibús | 30,95 | 7,72 | 36,77 | 3,94 | seg/km |
| Tiempo de Parada - Todo | 57,13 | 2,96 | 53,98 | 3,49 | seg/km |
| Tiempo de Parada - coche | 57,31 | 2,98 | 54,11 | 3,51 | seg/km |
| Tiempo de Parada - bus | 22,79 | 2,53 | 28,77 | 2,85 | seg/km |
| Tiempo de Parada - minibús | 12,1 | 5,68 | 19,1 | 2,58 | seg/km |
| Tiempo de Viaje - Todo | 144,28 | 2,9 | 138,91 | 3,74 | seg/km |
| Tiempo de Viaje - coche | 144,04 | 2,9 | 138,61 | 3,74 | seg/km |
| Tiempo de Viaje - bus | 198,78 | 3,38 | 213,07 | 5,98 | seg/km |
| Tiempo de Viaje - minibús | 198,67 | 8,92 | 202,18 | 5,72 | seg/km |
| Tiempo Total de Viaje - Todo | 72,81 | 2,06 | 70,82 | 2,85 | h |
| Tiempo Total de Viaje - coche | 71,54 | 1,96 | 69,53 | 2,85 | h |
| Tiempo Total de Viaje - bus | 0,79 | 0,09 | 0,8 | 0,13 | h |
| Tiempo Total de Viaje - minibús | 0,48 | 0,02 | 0,49 | 0,02 | h |

Tabla 24. Medidas de desempeño Plan 31 actual versus optimizado

Los otros dos escenarios simulados son para el periodo de 8:15-9:14 a.m. para el plan de tiempos de semáforos 51 y en el mismo periodo para el plan 51 optimizado. La Tabla 25 muestra los resultados que arrojó la simulación.

Como se puede observar los planes 31 y 51 en sus versiones optimizadas presentan mejores medidas de desempeño tanto para la demora, como para el tiempo total de viaje y número de paradas para todo el sistema, coche, bus y minibús.

El plan 31 presenta mejoras de alrededor del 7% en la demora y 17,8% en el número de paradas. Por su parte en el plan 51, las mejoras están en el orden de 21,5% para la demora y del 2% en el número de paradas.



| Serie Temporal | GENERAL DAVILA | | | | Unidades |
|-----------------------------------|----------------|---------------------|--------------------|---------------------|----------|
| | PLAN 51 ACTUAL | | PLAN 51 OPTIMIZADO | | |
| | Valor | Desviación Estándar | Valor | Desviación Estándar | |
| Flujo - Todo | 3330,5 | 22,43 | 3543,5 | 21,44 | veh/h |
| Flujo - coche | 3322 | 22,23 | 3534,75 | 21,19 | veh/h |
| Flujo - bus | 4,5 | 0,58 | 4,75 | 0,5 | veh/h |
| Flujo - minibús | 4 | 0 | 4 | 0 | veh/h |
| Número de Paradas - Todo | 0,22 | 0 | 0,21 | 0,01 | #/veh/km |
| Número de Paradas - coche | 0,22 | 0 | 0,21 | 0,01 | #/veh/km |
| Número de Paradas - bus | 0,23 | 0,01 | 0,23 | 0,02 | #/veh/km |
| Número de Paradas - minibús | 0,23 | 0,02 | 0,23 | 0,01 | #/veh/km |
| Número Total de Paradas - Todo | 11918,06 | 239,56 | 11677,72 | 479,26 | |
| Número Total de Paradas - coche | 11886,5 | 238,93 | 11645,47 | 480,26 | |
| Número Total de Paradas - bus | 16,83 | 2,62 | 17,41 | 2,76 | |
| Número Total de Paradas - minibús | 14,72 | 1,46 | 14,84 | 0,79 | |
| Tiempo de Demora - Todo | 152,76 | 3,87 | 119,98 | 6,38 | seg/km |
| Tiempo de Demora - coche | 153,01 | 3,89 | 120,15 | 6,39 | seg/km |
| Tiempo de Demora - bus | 71,75 | 8,14 | 63,65 | 7,22 | seg/km |
| Tiempo de Demora - minibús | 37,94 | 7,71 | 39,47 | 5,2 | seg/km |
| Tiempo de Parada - Todo | 134,2 | 3,38 | 102,57 | 5,77 | seg/km |
| Tiempo de Parada - coche | 134,45 | 3,4 | 102,74 | 5,78 | seg/km |
| Tiempo de Parada - bus | 50,18 | 7,21 | 43,04 | 6,25 | seg/km |
| Tiempo de Parada - minibús | 20,31 | 7,73 | 20,52 | 3,73 | seg/km |
| Tiempo de Viaje - Todo | 225,81 | 3,8 | 193,18 | 6,44 | seg/km |
| Tiempo de Viaje - coche | 225,84 | 3,81 | 193,12 | 6,46 | seg/km |
| Tiempo de Viaje - bus | 228,75 | 1,9 | 226 | 3,84 | seg/km |
| Tiempo de Viaje - minibús | 201,08 | 7,85 | 204,19 | 2,98 | seg/km |
| Tiempo Total de Viaje - Todo | 180,39 | 5,56 | 176,29 | 6,34 | h |
| Tiempo Total de Viaje - coche | 179,04 | 5,48 | 174,9 | 6,42 | h |
| Tiempo Total de Viaje - bus | 0,86 | 0,11 | 0,89 | 0,1 | h |
| Tiempo Total de Viaje - minibús | 0,49 | 0,02 | 0,5 | 0,01 | h |

Tabla 25. Medidas de desempeño Plan 51 actual versus optimizado

6.4. Diseño de la transición entre Plan 31 y 51 para Paseo General

Dávila

Como se comentó anteriormente, el objetivo de esta capítulo es evaluar el desempeño del modelo matemático propuesto en el capítulo anterior, mediante el diseño de un plan de transición para la arteria Paseo General Dávila de la ciudad de Santander, compuesta de 12 intersecciones semaforizadas. La evaluación de la validez y utilidad del modelo se basará en su capacidad para reducir al mínimo los retardos, las emisiones de contaminación del aire y el consumo de combustible y su eficacia para reducir los costos sociales asociados con el período de transición. Para realizar esta evaluación se simularán varios escenarios de transición que permitan definir cuál plan presenta mejores medidas de desempeño.



En esta sección se presentaran varios diseños de plan de transición para la arteria en estudio, incluyendo el modelo propuesto, y se analizara la capacidad de cada uno de estos para reducir el costo social asociado.

6.4.1. Construcción escenarios de transición

Para el caso en estudio se diseñaron varios planes de transición usando varias de las metodologías encontradas en la literatura y en la práctica para este fin. Los planes de transición se hicieron siguiendo los métodos: inmediato, dos ciclos, tres ciclos y el propuesto en esta investigación usando modelación matemática y ACO. Para cada plan se construyó un escenario de simulación con el objetivo de obtener los datos relevantes que permitan medir la eficacia de cada uno de los planes proyectados, en función del costo social de acuerdo con la función objetivo diseñada para este estudio.

A continuación se presentan los planes de transición para cada escenario que se utilizara para el análisis:

- ***Transición inmediata basada en los planes actuales (Plan 31-Plan 51):***

Este método es usado actualmente por el centro de control de tráfico para realizar los cambios en los tiempos de los semáforos y consiste en hacer el cambio del plan 31 al plan 51 a las 8:15 a.m. El método de transición inmediata es uno de los más utilizados en la práctica. Las tablas 26 y 27 muestran el plan de transición actual obtenido por el método inmediato.

| Nodo | Plan | Fase | | | | Ciclo | Offset |
|-------------|----------------|------|---|----|---|-------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | | |
| 3210 | Inicial | 77 | 3 | 10 | - | 90 | 0 |
| | Final | 97 | 3 | 10 | - | 110 | 4 |

| Nodo | Plan | Fase | | | | Ciclo | Offset |
|-------------|----------------|------|----|---|---|-------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | | |
| 3190 | Inicial | 74 | 16 | - | - | 90 | 0 |
| | Final | 94 | 16 | - | - | 110 | 5 |

| Nodo | Plan | Fase | | | | Ciclo | Offset |
|-------------|----------------|------|----|----|---|-------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | | |
| 3170 | Inicial | 12 | 62 | 16 | - | 90 | 0 |
| | Final | 12 | 82 | 16 | - | 110 | 4 |

| Nodo | Plan | Fase | | | | Ciclo | Offset |
|-------------|----------------|------|----|----|----|-------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | | |
| 3160 | Inicial | 47 | 15 | 17 | 11 | 90 | 15 |
| | Final | 64 | 17 | 17 | 12 | 110 | 5 |

Tabla 26. Plan de transición inmediata basado en planes actuales



| Nodo | Plan | Fase | | | | Ciclo | Offset |
|------|---------|------|----|----|---|-------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | | |
| 3140 | Inicial | 58 | 16 | 16 | - | 90 | 0 |
| | Final | 78 | 16 | 16 | - | 110 | 5 |

| Nodo | Plan | Fase | | | | Ciclo | Offset |
|------|---------|------|---|----|---|-------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | | |
| 3130 | Inicial | 69 | 3 | 15 | 3 | 90 | 35 |
| | Final | 89 | 3 | 15 | 3 | 110 | 4 |

| Nodo | Plan | Fase | | | | Ciclo | Offset |
|------|---------|------|----|----|---|-------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | | |
| 3080 | Inicial | 35 | 10 | 45 | - | 90 | 0 |
| | Final | 30 | 10 | 70 | - | 110 | 4 |

| Nodo | Plan | Fase | | | | Ciclo | Offset |
|------|---------|------|----|---|---|-------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | | |
| 3070 | Inicial | 74 | 16 | - | - | 90 | 35 |
| | Final | 94 | 16 | - | - | 110 | 57 |

| Nodo | Plan | Fase | | | | Ciclo | Offset |
|------|---------|------|----|----|---|-------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | | |
| 3270 | Inicial | 62 | 16 | 12 | - | 90 | 0 |
| | Final | 82 | 16 | 12 | - | 110 | 1 |

| Nodo | Plan | Fase | | | | Ciclo | Offset |
|------|---------|------|----|---|---|-------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | | |
| 3120 | Inicial | 74 | 16 | - | - | 90 | 35 |
| | Final | 88 | 22 | - | - | 110 | 1 |

| Nodo | Plan | Fase | | | | Ciclo | Offset |
|------|---------|------|----|----|---|-------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | | |
| 3090 | Inicial | 58 | 22 | 10 | - | 90 | 17 |
| | Final | 75 | 25 | 10 | - | 110 | 4 |

| Nodo | Plan | Fase | | | | Ciclo | Offset |
|------|---------|------|----|----|---|-------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | | |
| 3060 | Inicial | 62 | 16 | 12 | - | 90 | 54 |
| | Final | 82 | 16 | 12 | - | 110 | 86 |

Tabla 27. Plan de transición inmediata basado en planes actuales

- **Transición inmediata basada en los planes actuales optimizados (Plan 31 óptimo-Plan 51 óptimo):**

Este plan es obtenido a partir de los planes 31 y 51 después de que fueron optimizados en SYNCHRO, el cambio de un plan a otro se realizara de forma inmediata a las 8:15 a.m. Las tablas 28 y 29 muestran el plan de transición inmediato.

| Nodo | Plan | Fase | | | | Ciclo | Offset |
|------|---------|------|---|----|---|-------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | | |
| 3210 | Inicial | 75 | 3 | 12 | - | 90 | 0 |
| | Final | 95 | 3 | 12 | - | 110 | 3 |

| Nodo | Plan | Fase | | | | Ciclo | Offset |
|------|---------|------|----|----|---|-------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | | |
| 3170 | Inicial | 12 | 49 | 29 | - | 90 | 0 |
| | Final | 12 | 63 | 35 | - | 110 | 2 |

| Nodo | Plan | Fase | | | | Ciclo | Offset |
|------|---------|------|----|---|---|-------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | | |
| 3190 | Inicial | 56 | 34 | - | - | 90 | 0 |
| | Final | 90 | 20 | - | - | 110 | 5 |

| Nodo | Plan | Fase | | | | Ciclo | Offset |
|------|---------|------|----|----|----|-------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | | |
| 3160 | Inicial | 46 | 12 | 12 | 20 | 90 | 14 |
| | Final | 64 | 15 | 15 | 16 | 110 | 5 |

Tabla 28. Plan de transición inmediata basado en planes óptimos



| Nodo | Plan | Fase | | | | Ciclo | Offset |
|------|---------|------|----|----|---|-------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | | |
| 3140 | Inicial | 63 | 15 | 12 | - | 90 | 0 |
| | Final | 77 | 18 | 15 | - | 110 | 5 |

| Nodo | Plan | Fase | | | | Ciclo | Offset |
|------|---------|------|---|----|---|-------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | | |
| 3130 | Inicial | 72 | 3 | 12 | 3 | 90 | 31 |
| | Final | 89 | 3 | 15 | 3 | 110 | 4 |

| Nodo | Plan | Fase | | | | Ciclo | Offset |
|------|---------|------|----|----|---|-------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | | |
| 3080 | Inicial | 38 | 15 | 37 | - | 90 | 0 |
| | Final | 45 | 12 | 53 | - | 110 | 4 |

| Nodo | Plan | Fase | | | | Ciclo | Offset |
|------|---------|------|----|---|---|-------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | | |
| 3070 | Inicial | 78 | 12 | - | - | 90 | 39 |
| | Final | 95 | 15 | - | - | 110 | 57 |

| Nodo | Plan | Fase | | | | Ciclo | Offset |
|------|---------|------|----|----|---|-------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | | |
| 3270 | Inicial | 68 | 10 | 12 | - | 90 | 0 |
| | Final | 82 | 16 | 12 | - | 110 | 1 |

| Nodo | Plan | Fase | | | | Ciclo | Offset |
|------|---------|------|----|---|---|-------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | | |
| 3120 | Inicial | 78 | 12 | - | - | 90 | 39 |
| | Final | 90 | 20 | - | - | 110 | 3 |

| Nodo | Plan | Fase | | | | Ciclo | Offset |
|------|---------|------|----|----|---|-------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | | |
| 3090 | Inicial | 49 | 12 | 29 | - | 90 | 10 |
| | Final | 70 | 20 | 20 | - | 110 | 4 |

| Nodo | Plan | Fase | | | | Ciclo | Offset |
|------|---------|------|----|----|---|-------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | | |
| 3060 | Inicial | 66 | 12 | 12 | - | 90 | 58 |
| | Final | 83 | 15 | 12 | - | 110 | 86 |

Tabla 29. Plan de transición inmediata basado en planes óptimos

- **Transición en dos ciclos (2 pasos) basada en los planes actuales optimizados (Plan 31 óptimo-Plan 51 óptimo):**

En este plan, la transición se realiza en dos pasos o dos ciclos, también es un método ampliamente utilizado y consiste en el alargamiento o acortamiento de los tiempos de las fases de reparto de manera que el cambio se realice en dos pasos o ciclos. Para el diseño de este plan se utiliza como planes bases los obtenidos de la optimización del plan 31 y 51 respectivamente. De igual forma que en los casos anteriores el cambio empieza a las 8:15 a.m. Las tablas 30 y 31 muestran el plan de transición en dos ciclos.

| Nodo | Plan | Fase | | | | ciclo | Offset |
|------|---------|------|---|----|---|-------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | | |
| 3210 | Inicial | 75 | 3 | 12 | - | 90 | 0 |
| | 1 | 85 | 3 | 12 | - | 100 | 2 |
| | Final | 95 | 3 | 12 | - | 110 | 3 |

| Nodo | Plan | Fase | | | | ciclo | Offset |
|------|---------|------|----|---|---|-------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | | |
| 3190 | Inicial | 56 | 34 | - | - | 90 | 0 |
| | 1 | 73 | 27 | - | - | 100 | 3 |
| | Final | 90 | 20 | - | - | 110 | 5 |

Tabla 30. Plan de transición dos ciclos basado en planes óptimos



| Nodo | Plan | Fase | | | | Ciclo | Offset |
|------|---------|------|----|----|---|-------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | | |
| 3170 | Inicial | 12 | 49 | 29 | - | 90 | 0 |
| | 1 | 12 | 56 | 32 | - | 100 | 1 |
| | Final | 12 | 63 | 35 | - | 110 | 2 |

| Nodo | Plan | Fase | | | | Ciclo | Offset |
|------|---------|------|----|----|---|-------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | | |
| 3140 | Inicial | 63 | 15 | 12 | - | 90 | 0 |
| | 1 | 70 | 16 | 14 | - | 100 | 2 |
| | Final | 77 | 18 | 15 | - | 110 | 5 |

| Nodo | Plan | Fase | | | | Ciclo | Offset |
|------|---------|------|---|----|---|-------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | | |
| 3130 | Inicial | 72 | 3 | 12 | 3 | 90 | 33 |
| | 1 | 80 | 3 | 14 | 3 | 100 | 19 |
| | Final | 89 | 3 | 15 | 3 | 110 | 4 |

| Nodo | Plan | Fase | | | | Ciclo | Offset |
|------|---------|------|----|----|---|-------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | | |
| 3080 | Inicial | 38 | 15 | 37 | - | 90 | 0 |
| | 1 | 42 | 13 | 45 | - | 100 | 2 |
| | Final | 45 | 12 | 53 | - | 110 | 4 |

| Nodo | Plan | Fase | | | | Ciclo | Offset |
|------|---------|------|----|---|---|-------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | | |
| 3070 | Inicial | 78 | 12 | - | - | 90 | 39 |
| | 1 | 87 | 13 | - | - | 100 | 48 |
| | Final | 95 | 15 | - | - | 110 | 57 |

| Nodo | Plan | Fase | | | | Ciclo | Offset |
|------|---------|------|----|----|----|-------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | | |
| 3160 | Inicial | 46 | 12 | 12 | 20 | 90 | 14 |
| | 1 | 55 | 14 | 13 | 18 | 100 | 11 |
| | Final | 64 | 15 | 15 | 16 | 110 | 5 |

| Nodo | Plan | Fase | | | | Ciclo | Offset |
|------|---------|------|----|----|---|-------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | | |
| 3270 | Inicial | 68 | 10 | 12 | - | 90 | 0 |
| | 1 | 75 | 13 | 12 | - | 100 | 1 |
| | Final | 82 | 16 | 12 | - | 110 | 1 |

| Nodo | Plan | Fase | | | | Ciclo | Offset |
|------|---------|------|----|---|---|-------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | | |
| 3120 | Inicial | 78 | 12 | - | - | 90 | 39 |
| | 1 | 84 | 16 | - | - | 100 | 21 |
| | Final | 90 | 20 | - | - | 110 | 3 |

| Nodo | Plan | Fase | | | | Ciclo | Offset |
|------|---------|------|----|----|---|-------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | | |
| 3090 | Inicial | 49 | 12 | 29 | - | 90 | 10 |
| | 1 | 60 | 16 | 24 | - | 100 | 7 |
| | Final | 70 | 20 | 20 | - | 110 | 4 |

| Nodo | Plan | Fase | | | | Ciclo | Offset |
|------|---------|------|----|----|---|-------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | | |
| 3060 | Inicial | 66 | 12 | 12 | - | 90 | 58 |
| | 1 | 75 | 13 | 12 | - | 100 | 72 |
| | Final | 83 | 15 | 12 | - | 110 | 86 |

Tabla 31. Plan de transición dos ciclos basado en planes óptimos

- ***Transición en tres ciclos (3 pasos) basada en los planes actuales optimizados (Plan 31 óptimo-Plan 51 óptimo):***

El método utilizado para realizar este plan consiste en el alargamiento o acortamiento de los tiempos de las fases de reparto de manera que el cambio se realice en tres pasos o ciclos. Para el diseño de este plan se utiliza como bases los obtenidos de la optimización del plan 31 y 51 respectivamente. La tabla 32 muestra el plan de transición optimizado inmediato.



| Nodo | Plan | Fase | | | | Ciclo | Offset |
|------|---------|------|---|----|---|-------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | | |
| 3210 | Inicial | 75 | 3 | 12 | - | 90 | 0 |
| | 1 | 81 | 3 | 12 | - | 96 | 1 |
| | 2 | 88 | 3 | 12 | - | 103 | 2 |
| | Final | 95 | 3 | 12 | - | 110 | 3 |

| Nodo | Plan | Fase | | | | Ciclo | Offset |
|------|---------|------|----|---|---|-------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | | |
| 3190 | Inicial | 56 | 34 | - | - | 90 | 0 |
| | 1 | 67 | 30 | - | - | 97 | 1 |
| | 2 | 78 | 25 | - | - | 103 | 3 |
| | Final | 90 | 20 | - | - | 110 | 5 |

| Nodo | Plan | Fase | | | | Ciclo | Offset |
|------|---------|------|----|----|---|-------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | | |
| 3170 | Inicial | 12 | 49 | 29 | - | 90 | 0 |
| | 1 | 12 | 53 | 31 | - | 96 | 0 |
| | 2 | 12 | 58 | 33 | - | 103 | 1 |
| | Final | 12 | 63 | 35 | - | 110 | 2 |

| Nodo | Plan | Fase | | | | Ciclo | Offset |
|------|---------|------|----|----|----|-------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | | |
| 3160 | Inicial | 46 | 12 | 12 | 20 | 90 | 14 |
| | 1 | 52 | 13 | 13 | 19 | 97 | 11 |
| | 2 | 58 | 14 | 14 | 17 | 103 | 8 |
| | Final | 64 | 15 | 15 | 16 | 110 | 5 |

| Nodo | Plan | Fase | | | | Ciclo | Offset |
|------|---------|------|----|----|---|-------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | | |
| 3140 | Inicial | 65 | 15 | 12 | - | 92 | 0 |
| | 1 | 69 | 16 | 13 | - | 98 | 1 |
| | | 72 | 17 | 14 | - | 103 | 3 |
| | Final | 77 | 18 | 15 | - | 110 | 5 |

| Nodo | Plan | Fase | | | | Ciclo | Offset |
|------|---------|------|----|----|---|-------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | | |
| 3270 | Inicial | 68 | 10 | 12 | - | 90 | 0 |
| | 1 | 72 | 12 | 12 | - | 96 | 0 |
| | 2 | 77 | 14 | 12 | - | 103 | 1 |
| | Final | 82 | 16 | 12 | - | 110 | 1 |

| Nodo | Plan | Fase | | | | Ciclo | Offset |
|------|---------|------|---|----|---|-------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | | |
| 3130 | Inicial | 72 | 3 | 12 | 3 | 90 | 33 |
| | 1 | 77 | 3 | 13 | 3 | 96 | 24 |
| | 2 | 83 | 3 | 14 | 3 | 103 | 14 |
| | Final | 89 | 3 | 15 | 3 | 110 | 4 |

| Nodo | Plan | Fase | | | | Ciclo | Offset |
|------|---------|------|----|---|---|-------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | | |
| 3120 | Inicial | 78 | 12 | - | - | 90 | 39 |
| | 1 | 82 | 14 | - | - | 96 | 27 |
| | 2 | 86 | 17 | - | - | 103 | 15 |
| | Final | 90 | 20 | - | - | 110 | 3 |

| Nodo | Plan | Fase | | | | Ciclo | Offset |
|------|---------|------|----|----|---|-------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | | |
| 3080 | Inicial | 38 | 15 | 37 | - | 90 | 0 |
| | 1 | 40 | 14 | 42 | - | 96 | 1 |
| | 2 | 43 | 13 | 47 | - | 103 | 2 |
| | Final | 45 | 12 | 53 | - | 110 | 4 |

| Nodo | Plan | Fase | | | | Ciclo | Offset |
|------|---------|------|----|----|---|-------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | | |
| 3090 | Inicial | 49 | 12 | 29 | - | 90 | 10 |
| | 1 | 56 | 14 | 26 | - | 96 | 10 |
| | 2 | 63 | 17 | 23 | - | 103 | 10 |
| | Final | 70 | 20 | 20 | - | 110 | 10 |

| Nodo | Plan | Fase | | | | Ciclo | Offset |
|------|---------|------|----|---|---|-------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | | |
| 3070 | Inicial | 78 | 12 | - | - | 90 | 39 |
| | 1 | 83 | 13 | - | - | 96 | 45 |
| | 2 | 89 | 14 | - | - | 103 | 51 |
| | Final | 95 | 15 | - | - | 110 | 57 |

| Nodo | Plan | Fase | | | | Ciclo | Offset |
|------|---------|------|----|----|---|-------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | | |
| 3060 | Inicial | 66 | 12 | 12 | - | 90 | 58 |
| | 1 | 71 | 13 | 12 | - | 96 | 67 |
| | 2 | 77 | 14 | 12 | - | 103 | 76 |
| | Final | 83 | 15 | 12 | - | 110 | 86 |

Tabla 32. Plan de transición tres ciclos basado en planes óptimos



- **Transición obtenida a partir de modelación matemática y ACO (Plan 31 óptimo-Plan 51 óptimo):**

El diseño de este plan de transición se realiza utilizando el modelo matemático diseñado y un algoritmo ACO es utilizado para encontrar los parámetros óptimos para el cambio del plan 31 óptimo al plan 51 óptimo. Para el procedimiento de optimización los parámetros se establecen como sigue: $\lambda = 0,85$, $\delta = 0,2$, $\rho = 0,04$, hormigas=20 e interacciones=60; bajo estas condiciones se ejecuta el procedimiento ACO diseñado y se obtiene un plan de transición óptimo de cinco períodos o ciclos. La Tabla 33 muestra el plan transición obtenido.

| Nodo | Plan | Fase | | | | Ciclo | Offset |
|------|---------|------|---|----|---|-------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | | |
| 3210 | Inicial | 75 | 3 | 12 | - | 90 | 0 |
| | 1 | 85 | 3 | 12 | - | 100 | 2 |
| | 2 | 91 | 3 | 12 | - | 106 | 3 |
| | 3 | 93 | 3 | 12 | - | 108 | 3 |
| | 4 | 94 | 3 | 12 | - | 109 | 3 |
| | Final | 95 | 3 | 12 | - | 110 | 3 |

| Nodo | Plan | Fase | | | | Ciclo | Offset |
|------|---------|------|----|---|---|-------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | | |
| 3190 | Inicial | 56 | 34 | - | - | 90 | 0 |
| | 1 | 73 | 27 | - | - | 100 | 3 |
| | 2 | 81 | 25 | - | - | 106 | 5 |
| | 3 | 85 | 23 | - | - | 108 | 5 |
| | 4 | 87 | 22 | - | - | 109 | 5 |
| | Final | 90 | 20 | - | - | 110 | 5 |

| Nodo | Plan | Fase | | | | Ciclo | Offset |
|------|---------|------|----|----|---|-------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | | |
| 3170 | Inicial | 12 | 49 | 29 | - | 90 | 0 |
| | 1 | 12 | 56 | 32 | - | 100 | 1 |
| | 2 | 12 | 59 | 35 | - | 106 | 2 |
| | 3 | 12 | 61 | 35 | - | 108 | 2 |
| | 4 | 12 | 62 | 35 | - | 109 | 2 |
| | Final | 12 | 63 | 35 | - | 110 | 2 |

| Nodo | Plan | Fase | | | | Ciclo | Offset |
|------|---------|------|----|----|----|-------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | | |
| 3160 | Inicial | 46 | 12 | 12 | 20 | 90 | 14 |
| | 1 | 55 | 14 | 13 | 18 | 100 | 11 |
| | 2 | 59 | 15 | 15 | 17 | 106 | 5 |
| | 3 | 62 | 15 | 15 | 16 | 108 | 5 |
| | 4 | 63 | 15 | 15 | 16 | 109 | 5 |
| | Final | 64 | 15 | 15 | 16 | 110 | 5 |

| Nodo | Plan | Fase | | | | Ciclo | Offset |
|------|---------|------|----|----|---|-------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | | |
| 3140 | Inicial | 63 | 15 | 12 | - | 90 | 0 |
| | 1 | 70 | 16 | 14 | - | 100 | 2 |
| | 2 | 74 | 17 | 15 | - | 106 | 5 |
| | 3 | 75 | 18 | 15 | - | 108 | 5 |
| | 4 | 76 | 18 | 15 | - | 109 | 5 |
| | Final | 77 | 18 | 15 | - | 110 | 5 |

| Nodo | Plan | Fase | | | | Ciclo | Offset |
|------|---------|------|----|----|---|-------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | | |
| 3270 | Inicial | 68 | 10 | 12 | - | 90 | 0 |
| | 1 | 75 | 13 | 12 | - | 100 | 1 |
| | 2 | 80 | 14 | 12 | - | 106 | 1 |
| | 3 | 81 | 15 | 12 | - | 108 | 1 |
| | 4 | 81 | 16 | 12 | - | 109 | 1 |
| | Final | 82 | 16 | 12 | - | 110 | 1 |

Tabla 33. Plan de transición propuesto basado en planes óptimos



| Nodo | Plan | Fase | | | | Ciclo | Offset |
|------|---------|------|---|----|---|-------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | | |
| 3130 | Inicial | 72 | 3 | 12 | 3 | 90 | 33 |
| | 1 | 80 | 3 | 14 | 3 | 100 | 20 |
| | 2 | 85 | 3 | 15 | 3 | 106 | 4 |
| | 3 | 87 | 3 | 15 | 3 | 108 | 4 |
| | 4 | 88 | 3 | 15 | 3 | 109 | 4 |
| | Final | 89 | 3 | 15 | 3 | 110 | 4 |

| Nodo | Plan | Fase | | | | Ciclo | Offset |
|------|---------|------|----|---|---|-------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | | |
| 3120 | Inicial | 78 | 12 | - | - | 90 | 39 |
| | 1 | 84 | 16 | - | - | 100 | 22 |
| | 2 | 89 | 17 | - | - | 106 | 3 |
| | 3 | 90 | 18 | - | - | 108 | 3 |
| | 4 | 90 | 19 | - | - | 109 | 3 |
| | Final | 90 | 20 | - | - | 110 | 3 |

| Nodo | Plan | Fase | | | | Ciclo | Offset |
|------|---------|------|----|----|---|-------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | | |
| 3080 | Inicial | 38 | 15 | 37 | - | 90 | 0 |
| | 1 | 42 | 13 | 45 | - | 100 | 2 |
| | 2 | 43 | 12 | 51 | - | 106 | 4 |
| | 3 | 44 | 12 | 52 | - | 108 | 4 |
| | 4 | 45 | 12 | 52 | - | 109 | 4 |
| | Final | 45 | 12 | 53 | - | 110 | 4 |

| Nodo | Plan | Fase | | | | Ciclo | Offset |
|------|---------|------|----|----|---|-------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | | |
| 3090 | Inicial | 49 | 12 | 29 | - | 90 | 10 |
| | 1 | 60 | 16 | 24 | - | 100 | 8 |
| | 2 | 66 | 17 | 23 | - | 106 | 4 |
| | 3 | 68 | 18 | 22 | - | 108 | 4 |
| | 4 | 69 | 19 | 21 | - | 109 | 4 |
| | Final | 70 | 20 | 20 | - | 110 | 4 |

| Nodo | Plan | Fase | | | | Ciclo | Offset |
|------|---------|------|----|---|---|-------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | | |
| 3070 | Inicial | 78 | 12 | - | - | 90 | 39 |
| | 1 | 87 | 13 | - | - | 100 | 50 |
| | 2 | 92 | 14 | - | - | 106 | 57 |
| | 3 | 93 | 15 | - | - | 108 | 57 |
| | 4 | 94 | 15 | - | - | 109 | 57 |
| | Final | 95 | 15 | - | - | 110 | 57 |

| Nodo | Plan | Fase | | | | Ciclo | Offset |
|------|---------|------|----|----|---|-------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | | |
| 3060 | Inicial | 66 | 12 | 12 | - | 90 | 58 |
| | 1 | 75 | 13 | 12 | - | 100 | 73 |
| | 2 | 80 | 14 | 12 | - | 106 | 86 |
| | 3 | 81 | 15 | 12 | - | 108 | 86 |
| | 4 | 82 | 15 | 12 | - | 109 | 86 |
| | Final | 83 | 15 | 12 | - | 110 | 86 |

Tabla 34. Plan de transición propuesto basado en planes óptimos

Una vez definido los diferentes planes a utilizar en el estudio, se procedió a definir los respectivos escenarios de simulación, para lo cual se utilizó el *software* de simulación AIMSUN en su versión 8.10, para esto se diseñaron los diferentes planes de control asociados a cada método de transición y se estableció el plan maestro de control encargado de definir la forma como se realizara el proceso de cambio de planes.

Cada escenario se realizó con una duración de 1 hora de simulación, en el periodo comprendido entre las 7:45 a.m. hasta las 8:45 a.m. Iniciando siempre con el plan 31 (actual u optimo), introduciendo la transición a las 8:15 a.m. en cada uno de los casos hasta alcanzar el plan 51 en sus versiones actuales u optimizada según sea el caso, este último plan se repetirá hasta el fin del periodo de simulación.



Cada uno de estos escenarios se trabajó con cinco repeticiones y los datos para el análisis se realizaron basados en los resultados de la media respectiva a cada situación.

6.4.2. Discusión y análisis

El objetivo de esta sección es evaluar la eficacia de cada uno de los métodos establecidos anteriormente en términos del costo social asociado al mismo, según función de costo diseñada para este estudio. Para esto es necesario a partir de los datos obtenidos en los cinco escenarios de simulación establecidos obtener el costo social, así como los respectivos costos para el tiempo, costos operativos del vehículo, costo de emisión de gases contaminantes. Estos costos, no son medidas de desempeño directas para el *software* de simulación AIMSUN, pero que se pueden obtener a partir de los datos que genera el mismo tales como: flujo vehicular para cada sección del sistema, discriminados como coche, bus y minibús, y medidas de desempeño para cada sección según modelos HCM: tiempo de demora, tiempo de parada y porcentaje de paradas.

Los parámetros para la función de costo social para el caso de estudio se definen de la siguiente forma: El costo de tiempo por persona (VT) es establecido como 10,38 € /hora para vehículos ligeros, bus y minibús y se calcula usando un ingreso promedio por hora de 25,95 € /hora (CEDEX, 2010) y un factor de valor de tiempo como proporción del ingreso promedio por hora de 40%, según la metodología sugerida por Akçelik y Besley (2003). La tasa de ocupación de los vehículos se estableció como 1,3 pasajeros para vehículo particular, 58 pasajeros para los buses y 25 pasajeros para minibús (G.I.S.T., 2013).

El costo de operación por vehículo por galón de combustible es definido como 9,37 € /galón, calculado con un precio de la gasolina de 1,179 €/litro, y un factor de costo de recursos de combustible de 70% y la relación costo/combustible de 3 (Akçelik & Besley, 2003).

Para definir los costos sociales marginales de las emisiones de gases de efecto invernadero se estableció un precio para el dióxido de carbono (CO_2) de 8 €/tC (SENDECO2, 2015), lo anterior debido al desplome en el precio de las cuotas de



emisión del mismo en el mercado europeo, aunque estudios definen el valor de efecto invernadero del CO₂ para 2015-2030 entre 25€ - 30€ (Fankhauser, 1994) .

El peso promedio del monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC), y óxido de nitrógeno (NO_x) para cada modo de conducción se calculan a partir de resultados experimentales de Tong *et al.* (2000) y de Wing-Tat *et al.* (2005), los cuales se ajustan a los estándares promedio. De igual forma el potencial de calentamiento global (GWP) para el CO, HC y NO_x se calculará de acuerdo con lo establecido por Shine (2001). Estos valores y las tasas de ocupación para cada tipo de vehículo se muestran en la Tabla 35.

| | | Combustible (mg/seg) | CO (mg/seg) | GPW _{CO} | HC (mg/seg) | GPW _{HC} | Nox (mg/seg) | GPW _{NOx} | Tasa de Ocupación |
|----------------------------|-----------------------|-------------------------|----------------|-------------------|----------------|-------------------|-----------------|--------------------|----------------------|
| Vehículos Pasajeros | Aceleración | 62,62 | 9,54 | 3 | 0,69 | 12 | 0,62 | 40 | 1,3 |
| | Desaceleración | 28,11 | 9,96 | 3 | 0,58 | 12 | 0,69 | 40 | |
| | Espera | 18,11 | 2,99 | 3 | 0,36 | 12 | 0,14 | 40 | |
| Minibús | Aceleración | 133,1 | 12,63 | 3 | 2,36 | 12 | 13,94 | 40 | 25 |
| | Desaceleración | 117,1 | 10,92 | 3 | 1,96 | 12 | 11,65 | 40 | |
| | Espera | 25,9 | 7,5 | 3 | 1,15 | 12 | 4,04 | 40 | |
| Bus | Aceleración | 133,1 | 12,63 | 3 | 2,36 | 12 | 13,94 | 40 | 58 |
| | Desaceleración | 117,1 | 10,92 | 3 | 1,96 | 12 | 11,65 | 40 | |
| | Espera | 25,9 | 7,5 | 3 | 1,15 | 12 | 4,04 | 40 | |

Tabla 35. Tasas y consumo de combustible y emisiones de gases según modo de conducción y tipo de vehículo

Definidos los parámetros del modelo y los datos para cada sección en cada uno de los escenarios simulados se procedió, a través de una macro en Excel, a definir las medidas de desempeño para cada caso de estudio y de esta forma poder establecer comparaciones que permitan medir la eficacia de cada uno de los métodos estudiados.

El primer análisis que se realizó fue teniendo en cuenta todo el sistema en estudio y los resultados se resumen en las tablas 36 y 37, donde se relacionan las medidas de desempeños en estudio y el % de mejora con respecto al método actual.

| Método | Demora | | Tiempo Total | |
|---------------------------------------|---------|--------|--------------|--------|
| | Seg/veh | % | Horas | % |
| Inmediato planes actuales | 41,92 | – | 32,8 | – |
| Inmediato planes optimizados | 37,60 | 10,31% | 30,8 | 6,11% |
| Dos ciclos planes optimizados | 36,99 | 11,76% | 30,3 | 7,67% |
| Tres ciclos planes optimizados | 37,47 | 10,62% | 31,1 | 5,46% |
| Propuesto (ACO) | 35,56 | 15,17% | 29,1 | 11,35% |

Tabla 36. Resultados demora y tiempo total de viaje para el sistema en estudio



Como se puede observar en la tabla 36 el método propuesto presenta mejores desempeño en tiempo de demora promedio y tiempo total de viaje seguido por el método de dos ciclos, el método actual presento un pobre desempeño en comparación a los otros métodos en estudio.

| Método | Costo Social | | Costo del tiempo | | Costo operativo del vehículo | | Costo de emisiones de gases | |
|--------------------------------|--------------|-------|------------------|-------|------------------------------|--------|-----------------------------|--------|
| | EUR € | % | EUR € | % | EUR € | % | EUR € | % |
| Inmediato planes actuales | 618,81 | – | 528,8 | – | 69,3 | – | 20,7 | – |
| Inmediato planes optimizados | 597,17 | 3,50% | 513,1 | 2,97% | 64,6 | 6,86% | 19,5 | 5,75% |
| Dos ciclos planes optimizados | 587,63 | 5,04% | 507,4 | 4,04% | 61,5 | 11,25% | 18,7 | 9,68% |
| Tres ciclos planes optimizados | 593,67 | 4,06% | 510,2 | 3,51% | 64,2 | 7,46% | 19,3 | 6,72% |
| Propuesto (ACO) | 569,97 | 7,89% | 492,2 | 6,92% | 59,6 | 13,97% | 18,1 | 12,32% |

Tabla 37. Resultados costo social para el sistema en estudio

En lo referente al costo social para el sistema estudiado, el método propuesto presento el mejor desempeño en lo referente al costo social con un valor de 569,97€/h-simulada, en la tabla 37 se puede observar que la principal mejora con respecto al método actual se dio para el costo operativo del vehículo (13,97%), seguido por el costo de emisión de gases (12,32%), lo que demuestra un buen desempeño de este método desde el punto de vista del medio ambiente, con buenas mejoras también para los usuarios en términos de demora y costo del tiempo. El segundo mejor método fue el de transición en dos ciclos.

Para hacer un análisis más desglosado que permitiera evaluar el desempeño de los métodos en estudio sobre la arteria principal y sobre las calles secundarias, se dividió el sistema en un subsistema que comprendiera todas las intersecciones secundarias ó perpendiculares al Paseo General Dávila y otro subsistema que solo evaluara el efecto del costo social en la vía principal de estudio (Paseo General Dávila).

Las tablas 38 y 39 muestran los resultados obtenidos para Paseo General Dávila incluyendo el porcentaje de mejora de cada método con respecto al procedimiento actual.

Como se puede observar en la tabla 38 el método propuesto presenta los mejores desempeños en lo referente al tiempo de demora y tiempo total de viaje seguido por el método de tres ciclos.



| Calle Principal-Paseo General Dávila | | | | |
|--------------------------------------|---------|--------|--------------|--------|
| Método | Demora | | Tiempo Total | |
| | Seg/veh | % | Horas | % |
| Inmediato planes actuales | 28,10 | – | 22,0 | – |
| Inmediato planes optimizados | 25,42 | 9,55% | 20,8 | 5,31% |
| Dos ciclos planes optimizados | 25,09 | 10,70% | 20,6 | 6,56% |
| Tres ciclos planes optimizados | 24,78 | 11,79% | 20,5 | 6,70% |
| Propuesto (ACO) | 23,39 | 16,77% | 19,2 | 13,02% |

Tabla 38. Resultados demora y tiempo total de viaje para calle principal

Por otra parte en lo referente al costo social se puede decir, que el método propuesto presenta el mejor costo social asociado constante que se mantiene para todos los componentes de la función de costo, lo mismo no pasa con el método de tres ciclos el cual presenta buenos rendimiento en cuanto al costo social a nivel global pero no tan buenos en cuanto al costo para el medio ambiente, en este caso el método de dos ciclos presento mejoras más sustanciales (Tabla 28).

| Calle Principal-Paseo General Dávila | | | | | | | | |
|--------------------------------------|--------------|-------|------------------|-------|------------------------------|--------|-----------------------------|--------|
| Método | Costo Social | | Costo del tiempo | | Costo operativo del vehículo | | Costo de emisiones de gases | |
| | EUR € | % | EUR € | % | EUR € | % | EUR € | % |
| Inmediato planes actuales | 436,04 | – | 373,4 | – | 48,0 | – | 14,6 | – |
| Inmediato planes optimizados | 425,73 | 2,36% | 367,3 | 1,64% | 44,6 | 7,13% | 13,9 | 5,26% |
| Dos ciclos planes optimizados | 427,06 | 2,06% | 372,6 | 0,23% | 41,4 | 13,68% | 13,1 | 10,76% |
| Tres ciclos planes optimizados | 417,69 | 4,21% | 362,3 | 2,97% | 42,2 | 12,05% | 13,1 | 10,12% |
| Propuesto (ACO) | 406,02 | 6,89% | 352,8 | 5,51% | 40,4 | 15,80% | 12,8 | 12,76% |

Tabla 39. Resultados costo social para calle principal

Los resultados para las calles secundarias se resumen en las tablas 40 y 41, como se puede observar para este caso las mejores medidas de desempeño global se presentan cuando se usa el método de transición de dos ciclos, seguidos del método propuesto, pero si se observa al detalle, el método propuesto presenta mejores desempeños para el medio ambiente, pero el método de dos ciclos presenta mejores desempeño en lo referente al tiempo de demora, lo cual repercute altamente en el componente social dado el número de personas que sirve este sistema. Lo anterior entra a reforzar que la optimización previa que se realizó a los planes de transición actuales, beneficio el tiempo de demora para las calles secundarias, pero que a pesar de eso el mayor peso del costo social se encuentra en la calle principal, la cual beneficia en mayor grado el método propuesto.



Otro hecho a destacar es que el método de dos ciclos para este subsistema no mantiene sus niveles de mejoras para el componente asociado al consumo de combustible.

| Método | Calles Secundarias | | | |
|--------------------------------|--------------------|--------|--------------|-------|
| | Demora | | Tiempo Total | |
| | Seg/veh | % | Horas | % |
| Inmediato planes actuales | 13,82 | – | 10,8 | – |
| Inmediato planes optimizados | 12,18 | 11,85% | 10,0 | 7,73% |
| Dos ciclos planes optimizados | 11,90 | 13,92% | 9,8 | 9,92% |
| Tres ciclos planes optimizados | 12,68 | 8,24% | 10,5 | 2,94% |
| Propuesto (ACO) | 12,18 | 11,92% | 10,0 | 7,96% |

Tabla 40. Resultados demora y tiempo total de viaje para calles secundarias

| Método | Calles Secundarias | | | | | | | |
|--------------------------------|--------------------|--------|------------------|--------|------------------------------|--------|-----------------------------|--------|
| | Costo Social | | Costo del tiempo | | Costo operativo del vehículo | | Costo de emisiones de gases | |
| | EUR € | % | EUR € | % | EUR € | % | EUR € | % |
| Inmediato planes actuales | 182,77 | – | 155,4 | – | 21,3 | – | 6,1 | – |
| Inmediato planes optimizados | 171,43 | 6,20% | 145,8 | 6,17% | 20,0 | 6,23% | 5,6 | 6,95% |
| Dos ciclos planes optimizados | 160,57 | 12,15% | 134,8 | 13,22% | 20,1 | 5,79% | 5,6 | 7,06% |
| Tres ciclos planes optimizados | 175,98 | 3,71% | 147,9 | 4,82% | 22,0 | -2,85% | 6,2 | -1,48% |
| Propuesto (ACO) | 163,96 | 10,29% | 139,3 | 10,31% | 19,2 | 9,87% | 5,4 | 11,28% |

Tabla 41. Resultados costo social para calles secundarias

Por ultimo para ir mas al detalle y teniendo en cuenta que una de las intersecciones más críticas en el tema de congestión para este tramo de red es la comprendida por el cruce de Paseo General Dávila con la Calle Alonso Vega hasta el tramo de Bajada San Juan (ver Figura 35), la cual se aisló en este estudio para obtener los resultados del costo social asociados a cada método de transición en este nodo crítico.



Figura 40. Intersección Paseo General Dávila-Calle Alonso Vega



Los resultados para esta intersección se muestran en las Tablas 42 y 43, donde se puede observar que las mejoras obtenidas para este intersección en términos porcentuales con respecto al método actual son importantes.

| Intersección Paseo General Dávila-Alonso Vega | | | | |
|---|---------|--------|--------------|--------|
| Método | Demora | | Tiempo Total | |
| | Seg/veh | % | Horas | % |
| Inmediato planes actuales | 10,31 | – | 8,08 | – |
| Inmediato planes optimizados | 7,99 | 22,46% | 6,56 | 18,84% |
| Dos ciclos planes optimizados | 7,44 | 27,87% | 6,10 | 24,52% |
| Tres ciclos planes optimizados | 7,91 | 23,32% | 6,55 | 18,89% |
| Propuesto (ACO) | 8,08 | 21,62% | 6,62 | 18,09% |

Tabla 42. Resultados demora y tiempo total de viaje para intersección Paseo General Dávila-Alonso Vega

Sin embargo los mejores desempeños se logran con el método de dos ciclos, y que este junto con el método de tres ciclos, presentan mejores desempeños con respecto a los usuarios. El método propuesto no presenta mejoras consistentes en lo referente a los componentes de la función de costo pero si un buen desempeño global aunque no es el mejor.

| Intersección Paseo General Dávila-Alonso Vega | | | | | | | | |
|---|--------------|--------|------------------|--------|------------------------------|--------|-----------------------------|--------|
| Método | Costo Social | | Costo del tiempo | | Costo operativo del vehículo | | Costo de emisiones de gases | |
| | EUR € | % | EUR € | % | EUR € | % | EUR € | % |
| Inmediato planes actuales | 136,20 | – | 118,1 | – | 14,0 | – | 4,1 | – |
| Inmediato planes optimizados | 112,72 | 17,24% | 99,4 | 15,90% | 10,26 | 26,65% | 3,08 | 24,02% |
| Dos ciclos planes optimizados | 97,88 | 28,13% | 85,3 | 27,84% | 9,73 | 30,47% | 2,90 | 28,61% |
| Tres ciclos planes optimizados | 107,73 | 20,90% | 94,0 | 20,44% | 10,57 | 24,48% | 3,17 | 22,05% |
| Propuesto (ACO) | 107,68 | 20,94% | 94,3 | 20,18% | 10,31 | 26,28% | 3,07 | 24,47% |

Tabla 43. Resultados costo social para intersección Paseo General Dávila-Alonso Vega

En general se puede decir que el método propuesto presenta buenas medidas de desempeños tanto para el sistema global, como para la calle principal Paseo General Dávila. El método actual presenta desempeños menos amigables con el medio ambiente y el usuario. Y en general los métodos propuestos presentan niveles de mejoras importantes en los componentes asociados con el medio ambiente.



Capítulo 7

CONCLUSIONES FINALES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN





7. CONCLUSIONES FINALES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

En esta investigación se ha presentado el diseño de un modelo matemático no lineal para mejorar el rendimiento de la transición entre los planes de frecuencia de la señal en las intersecciones coordinadas. El modelo comprende la minimización de una función de costos sociales, que incluye una reducción en la demora, las emisiones de gases y el consumo de combustible. En consecuencia, este estudio asumió varias tareas con miras a cumplir los objetivos de investigación propuestos y varias actividades fueron desarrolladas y descritas a lo largo de los Capítulos 2-5. En este capítulo se condensan todos los resultados y aportes de esta tesis, estas contribuciones se van a enmarcar siguiendo los logros obtenidos en cada uno de los capítulos desarrollados. Por último se describen las futuras investigaciones que pueden derivarse del trabajo realizado.



7.1. Conclusiones

En el capítulo 2 se asumió la tarea de presentar una revisión de la literatura para analizar exhaustivamente, clasificar y analizar la literatura de transición existente. La revisión de la literatura se basó en una metodología de clasificación que fue diseñada específicamente para resumir el estado de la investigación actual y las tendencias, para de esta forma resaltar las brechas existentes en este campo de investigación y definir un punto un punto de partida para poder aportar soluciones al problema planteado.

A partir del análisis de las categorías resultantes, se hizo evidente que la mayoría de los estudios se orientaron a comparar el desempeño de los diferentes métodos aplicados con énfasis en la Shortway, Add, Subtract y Dwell. Por lo general, los métodos de transición Shortway superaron a los otros métodos en diferentes circunstancias, y los métodos de transición Dwell causaron niveles medios o altos de interrupción en el tráfico vehicular.

Sin embargo, pocos estudios abordan los métodos matemáticos, y los que lo hicieron tuvieron modelos relativamente simples y objetivos de optimización limitados, lo que deja un amplio espacio para las nuevas propuestas que aborden la optimización simultánea de diferentes medidas de eficiencia.

Con respecto al modo de operación en los estudios de transición, los porcentajes resultantes indicaron que el TOD y TRPS/modos ATCS se han estudiado igualmente; sin embargo, el modo de funcionamiento sigue siendo el TOD primera elección en muchos sistemas de control de tráfico debido a su rendimiento en entornos estables y su menor coste de implementación. Además, el análisis de la transición durante el modo de operación de preferencia se ha convertido cada vez más popular en los últimos años, y si la tendencia se mantiene, debe convertirse en un importante tema de estudio en un futuro próximo.

En los últimos años, las estrategias de simulación *software-* y *hardware* en bucle se han implementado para analizar las operaciones de control de tráfico. En la literatura de transición, la herramienta de simulación CORSIM y controladores Econolite son los más ampliamente utilizados en modelos basados HILS y SILS. Sin embargo, la disponibilidad



de nuevos controladores y herramientas de simulación que incluyen nuevas funciones y características permiten apoyar el proceso de investigación con herramientas que se adaptan mejor a las condiciones actuales de tráfico. En consecuencia, la investigación de la transición debería ampliarse para incluir el análisis de las versiones más actuales de los controladores y herramientas de simulación de tráfico.

En el capítulo 3 se revisó el marco teórico y la literatura existente sobre los modelos actuales para medir el desempeño y la eficiencia de los sistemas de tráfico, lo cual permitió levantar un marco de referencia para construir el modelo matemático con miras a la minimización de los costos sociales asociados al tráfico vehicular. El análisis de este capítulo llevo a definir que el modelo más apropiado para describir matemáticamente la demora o retardo es el definido en el *Manual Highway Capacity* (HCM) ("B. National Research Council. Transportation Research.," 2010). Este modelo de demora se expresa en términos de la duración del ciclo y el tiempo en verde y el flujo de tráfico y permite estimar el retardo promedio por vehículo para cada intersección en un corredor o arteria, suponiendo que no hay cola inicial. Por su parte, para los componentes de consumo de combustible y las emisiones de gases incluidos se concluyó trabajar con un modelo híbrido desarrollado a partir de los modelos propuestos por Akçelik (1983) y Frey, et al.,(2001), lo anterior basado en la suposición de tres cantidades independientes que corresponden a tres modos de conducción: espera, aceleración y desaceleración.

En el capítulo 4 el principal logro se constituye en el diseño de la una función de costo social en términos de demora, el consumo de combustible y las emisiones al aire, que se convierte en una nueva alternativa para la evaluación del impacto social de las intersecciones de señales considerando al usuario y los costos ambientales como medidas de desempeño. Esta función matemática aporta a varias utilidades ya que se puede utilizar para evaluar y optimizar los tiempos en la señal del semáforo y también los planes de transición que garanticen ser más efectivos y menos perjudiciales para el medio ambiente.

También se desarrolló una heurística para diseñar planes de transición de tiempos de semáforos de acuerdo con el número de períodos o etapas necesarias para llevar a



cabo la fase de cambio. Esta heurística se trabajó con el objetivo de reducir la interrupción del flujo vehicular al suavizar el cambio de desfase (φ), duración del ciclo (C) y los parámetros de la fase verde (g) durante el periodo de transición, convirtiéndose en otra alternativa de método de tipo empírico para definir planes de cambio de tiempo en los semáforos.

Por último, se estudió el impacto que tiene el número de periodos para alcanzar la transición en la función costo social; lo cual permitió concluir que las transiciones rápidas o muy lentas entre los planes de semaforización fueron asociados con altos costos sociales. En otras palabras, cuando el número de períodos o pasos para alcanzar la transición era pequeño o muy grande, el coste social aumentaba. En la zona intermedia donde se denotaba buenos costos sociales, se identifica que el menor número de pasos es favorable para los usuarios y los planes dentro de esta zona con mayor número de etapas para alcanzar la transición fueron más favorables para el medio ambiente.

En el capítulo 5 se define matemáticamente la transición y este modelo es evaluado en su desempeño usando la función costo social diseñada en capítulo 4, además es desarrollado un algoritmo de optimización de colonia de hormigas que permite encontrar los parámetros óptimos para la transición. Por ultimo un caso de estudio fue llevado a cabo para comparar la eficacia y el impacto en el costo social de este nuevo enfoque en comparación con los métodos tradicionales, tales como transición inmediata, en dos ciclos o en tres ciclos. Para lo cual el método propuesto siempre mostro superioridad sobre los otros métodos, obteniendo mejoras alrededor de 20% en los costos sociales y del 5% en la demora.

En el capítulo 6 se presenta el diseño de un plan de transición para para un tramo de la red semafórica del Paseo General Dávila en la ciudad de Santander y un análisis de los resultados obtenidos con el modelo propuesto. Se realizaron comparaciones que incluían diferentes escenarios con métodos tradicionales tales como transición inmediata, en dos ciclos o en tres ciclos y el método propuesto. Se concluyó que el método propuesto presento buenas medidas de desempeño tanto para el sistema global, como para la calle principal paseo General Dávila, con mejoras en el costo social



con respecto al método actual de alrededor del 8% y 7% respectivamente. En general los métodos propuestos presentan niveles de mejoras importantes en los componentes asociados con el medio ambiente. Una buena segunda alternativa que además favorece las calles secundarias fue el método de dos ciclos. Por último, se puede decir que el método usado actualmente evidencio desempeños menos amigables con el medio ambiente y el usuario.

7.2. Futuras Líneas de Investigación

Después de un cuidadoso análisis de los logros alcanzados, se identificaron brechas de investigación pertinentes, que permitieron plantear varias líneas que pueden ser considerados como áreas para las investigaciones futuras:

1. En estudios anteriores, la emulación en bucle se consideró como la primera opción para la simulación de control de tráfico. Luego, con el incremento en la necesidad de pruebas y el análisis de la funcionalidad de los nuevos y mejorados controladores, el *software* en bucle y el *hardware* en bucle se utilizaron como métodos para simular las operaciones de control de tráfico. En la literatura de transición, la evaluación de los controladores de tránsito bajo SILS y HILS se ha limitado a cierto tipo de controladores como Siemens, Econolite, McCain y controladores Naztec (la mayoría de ellos versiones desactualizadas). Así, el estudio de la fase de transición podría beneficiarse en gran medida de la comparación y el análisis (bajo diferentes condiciones de tráfico de carretera) y configuraciones de controladores más actuales utilizando métodos de simulación SIL y HIL. La investigación debe estar orientada a las versiones actuales de los controladores de Siemens, Econolite, McCain y Naztec y se extenderse a otros fabricantes de controladores como Peek y US Tráfico.
2. En los EE.UU., el porcentaje de millas de carreteras equipadas con el accionamiento de la señal de tráfico para los vehículos de emergencia ha aumentado de aproximadamente el 12% en 1997 al 22% en 2010 (Gordon & Trombly, 2011). La importancia de implementar correctamente los modos de operación preferente se acentúa porque la transición para la



sincronización de planes preventivos están ocurriendo con mayor frecuencia lo que conduce a una alteración significativa en los niveles de progresión en el flujo vehicular y por ende en un aumento de los tiempos de respuesta y la reducción de la seguridad, tanto para vehículos como para peatones. Por ejemplo, en 2004, una guía informativa para intersecciones señalizadas informó una interrupción entre 30 segundos a 7 minutos para recuperar la coordinación en un sistema preferente de la señal en el área metropolitana de Washington D.C (Rodegerdts *et al.*, 2004). Además, pueden ocurrir varios eventos de señal preferente durante un corto período de tiempo en ciertas carreteras cerca de las instalaciones de emergencia (por ejemplo, hospitales, estaciones de bomberos), que pueden propagar los efectos de transición. Se recomienda más investigación sobre los modos preferentes para vehículos de emergencia para así mitigar los efectos de la transición y mejorar los tiempos de respuesta y la seguridad. Una comparación entre las tecnologías de EVP (acústica, /, sensores, cámaras, seguimiento GPS, seguimiento del teléfono celular basado en infrarrojos estroboscópica, etc.) puede ser de gran interés.

3. Los modelos de simulación de tráfico permiten a los analistas obtener medidas de eficacia (como capacidad, demora, y el nivel de servicio) para una amplia gama de configuraciones de carretera y las condiciones operativas. En la literatura de transición, los resultados demostraron que CORSIM se prefiere como una herramienta de simulación de tráfico con un porcentaje de 52,6%, seguido por NetSim y VISSIM con porcentajes de 15,8% cada uno, y finalmente TRANSyT y Rosim con porcentajes de 10,5% y 5,3%, respectivamente. Sin embargo, los fabricantes de herramientas de simulación están lanzando constantemente nuevas versiones de sus *softwares*, y se hace más difícil de establecer criterios coherentes para su uso. Por lo tanto, ningún nivel determinado pueden llegar a ser obsoleta cada vez que una nueva versión es creada por los desarrolladores. Aun así, el tema es lo suficientemente importante como para alentar a la evaluación de nuevas versiones para el análisis de la fase de transición. Según la encuesta,



VISSIM era la herramienta de simulación de tráfico preferida con un porcentaje de 39%, seguido por SYNCHRO y TRANSYT con porcentajes de 26% y 10%, respectivamente. De hecho, se considera de gran importancia ampliar la investigación mediante el uso de herramientas de simulación que actualmente se utilizan en campo (como AIMSUN, PARAMICS, TransModeler, sincronización, MATSim y SIDRA).

4. Debido al número limitado de métodos matemáticos existentes y los objetivos de optimización, existe una creciente necesidad de desarrollar modelos nuevos y más complejos para determinar los parámetros óptimos de transición, que se adapten a las condiciones existentes. Por lo tanto, los objetivos de optimización, incluyendo sólo una medición de la eficiencia deben ser complementadas por abordar requisitos adicionales. Funciones de múltiples objetivos permiten soluciones integrales al permitir abordar simultáneamente más de una medida de eficiencia (como retraso, el consumo de combustible, emisiones de gases, el retraso de peatones, etc.). El desarrollo de tales funciones permitirá establecer los parámetros óptimos de transición que apunten a mejorar las medidas de desempeño que apunten a varios objetivos. Además, las herramientas de inteligencia artificial (como los algoritmos evolutivos y técnicas de aprendizaje automático) que se están aplicando con éxito en numerosos campos pueden ser utilizados con fines de optimización de la transición con la posibilidad de mejorar las soluciones aproximadas actuales.

5. Ya particularmente en lo referente al modelo matemático y la optimización diseñada, se pueden identificar las siguientes líneas de trabajo:

Una vez modelada matemáticamente la transición, se puede explorar con otras funciones objetivos, por ejemplo una función multiobjetivo que permita minimizar la demora y maximizar el ancho de banda que garantiza la ola verde en las arterias coordinadas.

Se pueden realizar estudios para determinar en qué punto exacto (momento del día) se debe realizar la transición, aspecto que no fue incluido en esta investigación.



Se puede rediseñar el componente ambiental, introduciendo nuevos agentes contaminantes al aire, a la vez que se puede trabajar con diferentes tasas de emisiones, de acuerdo con los estudios relevantes para cada país.

En lo referente a las simulaciones se puede trabajar el diseño de una API que incluya la evaluación de la función costo social, dentro del mismo escenario de simulación.

Se puede realizar un diseño de experimento para evaluar el efecto sobre el costo social en diferentes condiciones de tráfico.

Por último, otro tema de estudio puede ser el relativo al momento o punto en el tiempo en que se realiza la transición, aspecto que no fue tenido en cuenta en este estudio, pero que puede constituir en un elemento relevante para obtener mejores desempeños para el sistema.



REFERENCIAS





Referencias

- A. Unal, N. M. R., H. C. Frey, and Trb. (2003). Effect of arterial signalization and level of service on measured vehicle emissions. *Energy, Air Quality, and Fuels 2003: Energy and Environment*, 47-56.
- Abbas, M., Bullock, D., Head, L., & Trb. (2001). Real-time offset transitioning algorithm for coordinating traffic signals. *Advanced Traffic Management Systems and Vehicle-Highway Automation 2001: Highway Operations, Capacity, and Traffic Control*, 26-39.
- Ahn, K., Rakha, H., Trani, A., & Aerde, M. V. (2002). Estimating vehicle fuel consumption and emissions based on instantaneous speed and acceleration levels. *Journal of Transportation Engineering*, vol. 128, 182-190.
- Akçelik, R. (1983). Progress in fuel consumption modelling for urban traffic management.
- Akçelik, R., & Besley, M. (2001). *Acceleration and deceleration models*. Paper presented at the 23rd Conference of Australian Institutes of Transport Research (CAITR 2001), Monash University, Melbourne, Australia.
- Akçelik, R., & Besley, M. (2003). *Operating cost, fuel consumption, and emission models in aaSIDRA and aaMOTION*. Paper presented at the 25th Conference of Australian Institutes of Transport Research (CAITR 2003), University of South Australia, Adelaide, Australia.
- Akçelik, R., & Biggs, D. C. (1987). Acceleration profile models for vehicles in road traffic. *Transportation Science*, 21(1), 36-54.
- Akcelik, R., & Research, B. A. R. (1981). Traffic signals : capacity and timing analysis. *Vic.: Australian Road Research Board*.
- Ayuntamiento de Santander. (2010). Plan Estrategico Santander 2010-2020.
- B. National Research Council. Transportation Research. (2010). *HCM 2010: highway capacity manual*. Retrieved from <http://www.hcm2010.org/>
- Bachman, W., Sarasua, W., & Guensler, R. (1996). Geographic information system framework for modeling mobile-source emissions. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1551(-1), 123-132.
- Bachman, W., Sarasua, W., Hallmark, S., & Guensler, R. (2000). Modeling regional mobile source emissions in a geographic information system framework. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 8(1), 205-229.
- Balke, K., Rao, K., & Husted, M. (1998). Incorporing the Effects of Signal Transitions in the selection of Timing Plans in Traffic Responsive Signal Systems. Texas: Texas Transportation Institute, Texas A&M University, College Station,.
- Barth, M., & Boriboonsomsin, K. (2008). Real-world carbon dioxide impacts of traffic congestion. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2058(-1), 163-171.
- Basu, S., Alan, M. V. a. A., & United States. Federal Highway Administration. Traffic Systems, D. (1981). A study of the factors influencing the number of signal timing plans required for UTCS first generation traffic control systems. Washington: Federal Highway Administration Offices of Research and Development Traffic Systems Division.



- Bayley, C. (1980). *Energy implications of coordinated traffic signals*. Paper presented at the Can Traffic Management Reduce Vehicle Fuel Consumption and Affect Vehicle Design Requirements, Seminar and Workshop, 1980, Melbourne, Australia.
- Beckmann, M., McGuire, C. B., & Winsten, C. B. (1956). *Studies in the Economics of Transportation*.
- Benekohal, R. F., & El-Zohairy, Y. M. (2001). Multi-regime arrival rate uniform delay models for signalized intersections. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 625-667.
- Beydoun, M., & Guldman, J. M. (2006). Vehicle characteristics and emissions: logit and regression analyses of I/M data from Massachusetts, Maryland, and Illinois. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 11(1), 59-76.
- Bloomberg, L., & Dale, J. (2000). *A comparison of the VISSIM and CORSIM traffic simulation models*. Paper presented at the Institute of Transportation Engineers Annual Meeting.
- Bowyer, D. P., Akçelik, R., & Biggs, D. C. (1985). *Guide to fuel consumption analyses for urban traffic management*.
- Bretherton, R. D. (1979). *Five methods of changing fixed-time traffic signal plans*. Crowthorne: Traffic Engineering Dep., Transport and Road Research Laboratory.
- Bureau of labor statistics. (2012, Octubre). *Economy at a Glance*. Retrieved from http://www.bls.gov/eag/eag.us.htm#eag_us1.f.3
- CARB. (2002). Public meeting to consider approval of revision to the state's on-road motor vehicle emission inventory—Technical support document, Section 4.13, Factor for converting THC emission rates to TOG/ROG. *California Air Resources Board*.
- CEDEX, C. d. E. d. D. y. o. p. (2010). *Evaluación Económica de Proyectos de Transporte*.
- Centre for Economics and Business Research. (2014). *The future economic and environmental costs of gridlock in 2030*. London: (Cebr).
- Cohen, D., Head, L., & Shelby, S. G. (2007). Performance analysis of coordinated traffic signals during transition. *Transportation research record*.(2035), 19-31.
- Collantes, P. (2011). *Modelización de la Calidad Percibida y Calidad Deseada del Transporte Público para implantar Estrategias de Marketing en Áreas Urbanas*. (Doctorado), Univesidad de Cantabria, Santander.
- Chang, E. C.-P. (1987). Signal transition interval for computerized traffic signal systems. *Yün shu chi hua = transportation planning journal*, 16(13).
- Chang, T.-H., & Lin, J.-T. (2000). Optimal signal timing for an oversaturated intersection. *Transportation Research Part B: Methodological*, 34(6), 471-491. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0191-2615\(99\)00034-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0191-2615(99)00034-X)
- Chang, Y.-C., Li, V. C., & Chiang, C.-J. (2014). An ant colony optimization heuristic for an integrated production and distribution scheduling problem. *Engineering Optimization*, 46(4), 503-520. doi: 10.1080/0305215x.2013.786062
- Chin, S. M., Franzese, O., Greene, D. L., Hwang, H. L., & Gibson, R. C. (2004). *Temporary Losses of Highway Capacity and Impacts on Performance: Phase 2: United States*.: Department of Energy.
- Christidis, P., & Rivas, J. N. I. (2012). *Measuring road congestion*: Institute for Prospective and Technological Studies, Joint Research Centre.



- D'Acierno, L., Gallo, M., & Montella, B. (2012). An Ant Colony Optimisation algorithm for solving the asymmetric traffic assignment problem. *European Journal of Operational Research*, 217(2), 459-469. doi: 10.1016/j.ejor.2011.09.035
- Darma, Y., Karim, M. R., Mohamad, J., & Abdullah, S. (2005). Control delay variability at signalized intersection based on HCM method *Proceeding of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 945-958.
- Dorigo, M., Birattari, M., & Stutzle, T. (2006). Ant colony optimization. *Computational Intelligence Magazine, IEEE*, 1(4), 28-39.
- Dorigo, M., & Caro, G. D. (1999). The ant colony optimization meta-heuristic. In C. David, D. Marco, G. Fred, D. Dipankar, M. Pablo, P. Riccardo & V. P. Kenneth (Eds.), *New ideas in optimization* (pp. 11-32): McGraw-Hill Ltd., UK.
- Energy Information Administration. (2012, Octubre). *Gasoline and Diesel Fuel Update*. Retrieved from <http://www.eia.gov/petroleum/gasdiesel/>
- Environmental Protection Agency. (2013). *Official Release of EMFAC2011 Motor Vehicle Emission Factor Model for Use in the State of California*. (EPA-R09-OAR-2013-0126 FRL-9788-3).
- EPA. (2002). *National air pollutant emission trends update*. (1998-2002, EPA 454/E- 98-007). Washington, DC.: US Government Printing Office.
- EPA. (2010). *Motor Vehicle Emissions Simulator (MOVES). User Guide for MOVES2010a*. (EPA-420-B-10-036). Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency.
- EPA. (2012). *Inventory of U.S. Greenhouse gas emissions and sinks: 1990-2010*. Paper presented at the Notice of availability and request for comments.
- Fankhauser, S. (1994). The Social Costs of Greenhouse Gas Emissions: An Expected Value Approach. *Energy Journal*, 15(2), 157-184. doi: <http://www.iaee.org/en/publications/journal.aspx>
- FEMP. (2013). *Implantación de los Planes de Movilidad Urbana Sostenible: Federación Española de Municipios y Provincias*.
- Frey, H. C., Roupail, N. M., Unal, A., & Colyar, J. D. (2001). Emissions reduction through better traffic management: An empirical evaluation based upon on-road measurements.
- Fu, L., & Hellinga, B. (2000). Delay variability at signalized intersections. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 15-221.
- G.I.S.T. (2013). *Estudio de Seguimiento e Indicadores del Plan de Movilidad Sostenible de Santander*. Santander, España: Grupo de Investigación de Sistemas de Transporte Universidad de Cantabria.
- Gkatzoflias, D., Kouridis, C., Ntziachristos, L., & Samaras, Z. (2007). *COPERT 4. Computer programme to calculate emissions from road transport. ETC-ACC (European Topic Centre on Air and Climate Change)*.
- Gordon, S. R., & Trombly, J. (2011). *Deployment of ITS: A Summary of the 2010 National Survey Results: Oak Ridge National Laboratory (ORNL)*.
- Hale, D. (2005). *Traffic Network Study Tool—TRANSYT-7F, United States Version. McTrans Center in the University of Florida*.
- Hallmark, S. L., Fomunung, I., Guensler, R., & Bachman, W. (2000). Assessing impacts of improved signal timing as a transportation control measure using an activity-



- specific modeling approach. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1738(-1), 49-55.
- Hamilton, C. L. (2000). *Evaluation of traffic signal controller transition methods*. Available from <http://worldcat.org/z-wcorg/> database.
- Han, B. (1996). A new comprehensive sheared delay formula for traffic signal optimisation. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 155-171.
- Haworth, N. L., & Symmons, M. A. (2004). *The contribution of alcohol to work-related road crashes in New South Wales*. Paper presented at the Road safety research, policing and education conference, 2004, perth, western australia, australia.
- He, J., & Hou, Z. (2012). Ant colony algorithm for traffic signal timing optimization. *Advances in Engineering Software*, 43(1), 14-18. doi: 10.1016/j.advengsoft.2011.09.002
- Hunt, P. B., & Transport and Road Research, L. (1981). *SCOOT, a traffic responsive method of coordinating signals*. Crowthorne, Berkshire: Transport and Road Research Laboratory.
- Hush, D., & Albeck, J. (2006) Synchro Studio v7.0 User Guide.: Trafficware Ltd.
- Instituto Cántabro de Estadística. (2013). *Explotación Estadística Padrón Municipal de Habitantes Cantabria 2012 (Octava Edición ed.)*. Cantabria: Instituto Cántabro de Estadística.
- Kim, B. S., & Joo, C. M. (2012). Ant colony optimisation with random selection for block transportation scheduling with heterogeneous transporters in a shipyard. *International journal of production research*, 50(24), 7229-7241. doi: 10.1080/00207543.2011.645078
- Koonce, P., Rodegerdts, L., Lee, K., Quayle, S., Beaird, S., Braud, C., . . . Urbanik, T. (2008). *Traffic signal timing manual*.
- Kwak, J., Park, B., & Lee, J. (2012). Evaluating the impacts of urban corridor traffic signal optimization on vehicle emissions and fuel consumption. *Transportation Planning and Technology*, 35(2), 145-160. doi: 10.1080/03081060.2011.651877
- Lee, J. (2009). Development and testing of a constrained optimization model for traffic signal plan transition.
- Lee, J., & Williams, B. M. (2011). Fundamental Insight into Signal Plan Transition Methods. *Journal of Transportation Engineering-Asce*, 137(10), 676-686. doi: 10.1061/(asce)te.1943-5436.0000269
- Lee, J., & Williams, B. M. (2012). Development and evaluation of a constrained optimization model for traffic signal plan transition. *Transportation Research Part C-Emerging Technologies*, vol. 20, pp. 185-198.
- Li, X. G., Li, G. Q., Pang, S. S., Yang, X. G., & Tian, J. L. (2004). Signal timing of intersections using integrated optimization of traffic quality, emissions and fuel consumption: a note. *Transportation Research Part D-Transport and Environment*, 9(5), 401-407. doi: 10.1016/j.trd.2004.05.001
- Liao, T. Y., & Machemehl, R. B. (1998). Fuel Consumption Estimation and Optimal Traffic Signal Timing. *Southwest Region University Transportation Center, Center for Transportation Research, University of Texas at Austin*.
- Lieberman, E., & Wicks, D. (1974). A Rapid Signal Transition Algorithm. *Journal of the Transportation Research Board*, vol. 509, pp. 158-168.



- Litman, T. (2013). Evaluating Active Transport Benefits and Costs. *Victoria Transport Policy Institute*. Victoria, BC: Victoria Transport Policy Institute. Retrieved from <http://www.vtpi.org/nmt-tdm.pdf>.
- Liu, H. (2008). Travel time prediction for urban networks. *Netherlands TRAIL Research School*, vol. 2008.
- McGowan, C. (1980). *Traffic Signal Transition in Computerized Systems*. Paper presented at the Computing in Civil Engineering, Batimore.
- McNeil, D. R. (1968). A solution to the fixed-cycle traffic light problem for compound Poisson arrivals. *Journal of Applied Probability*, 624-635.
- McShane, W. R., & Roess, R. P. (2011). *Traffic engineering*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall.
- Messenger, G. S., Richardson, D. B., Graefe, P. W. U., & Mufti, I. H. (1980). Urban Traffic Signal Control for Fuel Economy (Economie d'Essence Grace a la Commande des Feux de Circulation en Zone Urbaine): DTIC Document.
- Messer, C. J., Fambro, D. B., Turner, J. M., Texas. State Dept. of Highways and Public, T., & United States. Federal Highway, A. (1976). Analysis of diamond interchange operation and development of a frontage road level of service evaluation program--PASSER III:final report. Texas: College Station: Texas Transportation Institute.
- Michalopoulos, P. G., & Pisharody, V. B. (1981). Derivation of delays based on improved macroscopic traffic models. *Transportation Research Part B: Methodological*, 299-317.
- MOVE, D. (2014). Update of the handbook on External Costs of Transport". *DG MOVE*.
- Murat, Y. S., & Baskan, O. (2006). Modeling vehicle delays at signalized junctions: Artificial neural networks approach. *Journal of scientific & industrial research* 558-564.
- National Research Council . Transportation Research, B. (2010). HCM 2010 : highway capacity manual. from <http://www.hcm2010.org/>
- Nelson, E. J., & Bullock, D. (2000). Impact of emergency vehicle preemption on signalized corridor operation : an evaluation. *Transportation research record*.(1727).
- Obenberger, J., & Collura, J. (2001). Transition strategies to exit preemption control : state-of-the-practice-assessment. *Transportation research record*, 72-79.
- Obenberger, J., & Collura, J. (2007). Methodology to assess traffic signal transition strategies for exit preemption control. *Transportation Research Record*(2035), 158-168. doi: 10.3141/2035-18
- Observatorio de la Sostenibilidad en España. (2014). Sostenibilidad en España. España: Observatorio de la Sostenibilidad en España.
- Oduyemi, K. O. K., & Davidson, B. (1998). The impacts of road traffic management on urban air quality. *Science of the total environment*, 59-66.
- Olszewski, P. (1993). Overall delay, stopped delay, and stops at signalized intersections. *Journal of transportation engineering*, 835-852.
- Owen, B. (2005). Air quality impacts of speed-restriction zones for road traffic. *Science of the total environment*, 340(1), 13-22.



- Pandian, S., Gokhale, S., & Ghoshal, A. K. (2009). Evaluating effects of traffic and vehicle characteristics on vehicular emissions near traffic intersections. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 14(3), 180-196.
- Park, B., Yun, I., Best, M., McGhee, C. C., University of Virginia. Center for Transportation, S., Virginia Transportation Research, C., & Virginia. Dept. of, T. (2008). *Evaluation of pre-emption and transition strategies for Northern Virginia Smart Traffic Signal Systems (NVSTSS)*. Charlottesville, Va.: Virginia Transportation Research Council.
- Park, B. B., Santra, P., Yun, I., & Lee, D. H. (2004). Optimization of time-of-day breakpoints for better traffic signal control. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1867, pp. 1217-1223.
- Penabaena-Niebles, R., Cantillo, V., Cuentas, S., & Moura, J. L. (2014). Transition between Signal Timing Plans: A Methodological and Analytical Overview. *Transport Reviews*, 34(3), 356-378. doi: 10.1080/01441647.2014.905648
- Patha, R., Quadrioglio, L., & Zechman, E. (2012). Comparing Ant Colony Optimization and Genetic Algorithm Approaches for Solving Traffic Signal Coordination under Oversaturation Conditions. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 27(1), 14-28. doi: 10.1111/j.1467-8667.2010.00715.x
- Rakha, H., & Ding, Y. (2002). Impact of stops on vehicle fuel consumption and emissions. *Journal of Transportation Engineering*, 129(1), 23-32.
- Rao, S. S., & Rao, S. (2009). *Engineering optimization: theory and practice*: John Wiley & Sons.
- Robertson, D. I., Lucas, C. F., & Baker, R. T. (1980). Coordinating traffic signals to reduce fuel consumption.
- Rodegerdts, L. A., Nevers, B., Robinson, B., Ringert, J., Koonce, P., Bansen, J., . . . Suggett, J. (2004). Signalized intersections: informational guide.
- Ross, P. (1977). An Evaluation of Network Signal Timing Transition Algorithms. *Transportation Engineering*, vol. 47, pp. 17-21.
- Santos, L., Coutinho-Rodrigues, J., & Current, J. R. (2010). An improved ant colony optimization based algorithm for the capacitated arc routing problem. *Transportation Research Part B-Methodological*, 44(2), 246-266. doi: 10.1016/j.trb.2009.07.004
- Schrank, D., Eisele, B., & Lomax, T. (2012). TTI's 2012 Urban Mobility Report. *Texas A&M Transportation Institute. The Texas A&M University System*.
- Schrank, D. L., & T. J. Lomax, I. (2011). Texas Transportation, M. Texas Transportation Institute. Texas: University Transportation Center for, R. American, F. Transportation Builders Association. Transportation Development, et al., 2011 urban mobility report.
- Selekwa, M. F., Mussa, R. N., & Chiteshe, A. (2003). Application of LQ modelling and optimization in urban traffic control. *Optimal control applications & methods*, 24(6), 331-345.
- SENDECO2. (2015). Sistema Europeo de Negociación de CO₂: Precios CO₂. Retrieved 10/08/2015, 20015, from <http://www.sendeco2.com/es/precios-co2>
- Shelby, S., Bullock, D., & Gettman, D. (2006). Transition Methods in Traffic Signal Control *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1978, pp. 1130-1140.



- Shine, K. P. (2001). Radiative forcing of climate change. *Solar Variability and Climate*, 363-373.
- Stevanovic, A. (2010). *Adaptive traffic control systems: Domestic and foreign state of practice*.
- Stevanovic, A., Stevanovic, J., Zhang, K., & Batterman, S. (2009). Optimizing traffic control to reduce fuel consumption and vehicular emissions. *Transportation Research Record: Journal of the transportation research board*, 105-113.
- Su, Y., Wei, Z., Cheng, S., Yao, D., Zhang, Y., & Li, L. (2009). Delay Estimates of Mixed Traffic Flow at Signalized Intersections in China. *Tsinghua Science & Technology Tsinghua Science & Technology*, 157-160.
- Sunkari, S. R., Engelbrecht, R. J., Balke, K. N., Texas. Dept. of Transportation. Research and Technology Implementation, O., & Texas Transportation, I. (2004). *Evaluation of advance coordination features in traffic signal controllers*. College Station, Tex.; Springfield, Va.: Texas Transportation Institute, Texas A & M University System ; Available through the National Technical Information Service.
- Tong, H. Y., Hung, W. T., & Cheung, C. S. (2000). On-road motor vehicle emissions and fuel consumption in urban driving conditions. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 50(4), 543-554.
- U.S. Department of Transportation. (2010). Transportation's role in reducing U.S. greenhouse gas emissions.
- Vitins, B. J., & Axhausen, K. W. (2009). Optimization of Large Transport Networks Using the Ant Colony Heuristic. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 24(1), 1-14. doi: 10.1111/j.1467-8667.2008.00569.x
- Watson, H. C. (1980). *Sensitivity of fuel consumption and emissions to driving patterns and vehicle design*. Paper presented at the Can Traffic Management Reduce Vehicle Fuel Consumption and Affect Vehicle Design Requirements, Seminar and Workshop, 1980, Melbourne, Australia.
- Webster, F. V. (1958). Traffic signal settings. *London: Her Majesty's Stationery Office*.
- Wing-Tat, H., Hing-Yan, T., & Chun-Shun, C. (2005). A Modal Approach to Vehicular Emissions and Fuel Consumption Model Development. *Journal of the Air & Waste Management Association (Air & Waste Management Association)*, vol. 55, 1431-1440.
- Yaghini, M., Foroughi, A., & Nadjari, B. (2011). Solving railroad blocking problem using ant colony optimization algorithm. *Applied Mathematical Modelling*, 35(12), 5579-5591. doi: 10.1016/j.apm.2011.05.018
- Yun, I., Best, M., & Park, B. (2008). Evaluation of Transition Methods of the 170E and 2070 ATC Traffic Controllers after Emergency Vehicle Preemption. *Journal of Transportation Engineering*, 134(10), 423-431. doi: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2008)134:10(423)
- Yun, I., Best, M., & Park, B. (2008). Traffic Controller Performance During Time-of-Day Transition at Coordinated Actuated Signal Systems. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 92-99.
- Zlatkovic, M. (2012). Transit signal priority: Simulation-based modeling, evaluation and improvement (Vol. 73).





Anexos





Anexo 1

ENCUESTA VALIDACIÓN DE EXPERTOS



SURVEY IN TRAFFIC SIGNAL CONTROL SYSTEMS

This Survey is directed to practitioners and researchers in traffic engineering in the U.S and selected countries. The goal of this questionnaire is to synthesize the current state of practice on tools and methods in Traffic Signal Control Systems and Transition procedure. This study is developed by Civil and Industrial Engineering Departments of Universidad del Norte in Barranquilla, Colombia.

According to your experience in Traffic Signal Control Systems and transition procedures answer the following questions:

*** Required**

City *

Please indicate the type of your center or agency *

- Government
- Education Center
- Consultant
- Other:

Which operating mode is most widely used in your city or center? *

Operating modes: This category considers the most widely applied modes of operation in traffic signal control

- Time-of-Day Transition (TOD)
- Traffic-responsive
- Pre-emption
- Other:



Which simulation tool or program is used in your city or center? *

Simulation tool or programs used: This category includes a list of available simulation tools.

- NETSIM
- TRANSYT
- CORSIM:
- VISSIM:
- ROSIM:
- AIMSUM
- PARAMICS
- VISSIM
- TRANSMODELER
- SYNCHRO
- Other:

Which controller is used in your city or center? *

Controller: this category includes a list of available controllers

- Eagle (EPAC300)
- Econolite (ASC/3, 2070 ATC, ASC2S, ASC/3-2070)
- Siemens (Nextphase)
- Naztec (Model 980)
- Mc Cain (170E)
- Other:

Which transition method is used in your city or center? *

Transition method used: This category covers transition methods found in the literature.

- Immediate Transition Method
- Two cycle transition method
- Three cycle transition method
- Dwell (Hold)/Maximum Dwell (Max dwell):
- Add/ Add Only/Longway/Long
- Subtract/Short
- Shortway/Smooth/Bestway/Minimax/Short-long/Short route/shortest:
- Other:

Do you think that an appropriate transition between timing plans has a positive effect on:

*



| | YES | NO |
|------------------|-----------------------|-----------------------|
| Delay | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Fuel Consumption | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Gas emission | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

Do you consider that the transition between timing plans is still an unresolved problematic? *

1 2 3 4 5

Strongly disagree Strongly agree

Submit

Never submit passwords through Google Forms.

100%: You made it.



Anexo 2
CÓDIGO MATLAB PARA LA FUNCIÓN DE COSTO



```
function[qo qf Resultados]=tranSEM_V02(Vo, Vf, COo, COf, Tf, flow)
%-----
% TranSEM es una herramienta informática para la toma de
% decisiones en la programación de los tiempos de los semáforos
durante
% la transición debido a los cambios en los planes de temporización
durante
% periodos del día a otro (hora pico a hora valle).
%-----
%----- VARIABLES -----
%-----
% Vo:   Matriz de valores iniciales de g, X y S,      [Matriz].
% Vf:   Matriz de valores finales de g, X y S,      [Matriz].
% COo:  Matriz de valores iniciales de C y Offset,   [Matriz].
% COf:  Matriz de valores finales de C y Offset,   [Matriz].
% n:    Número de transiciones,                    [Escalar].
% V:    Número de tipos de vehículos,              [Escalar].
% k:    Fase,                                       [Escalar].
% Tf:   Duración del periodo de análisis,          [Escalar].
% AT:   Tipo de Arribo [1 a 6],                    [Escalar].
% VT:   Valor del tiempo ($US/hora),               [Escalar].
% OR:   Tasa de ocupación por tipo de vehículo,    [Vector 1xV].
% PHF:  Factor pico,                               [Escalar].
% SCF:  Costo Social de combustible,               [Vector 1xV].
% tao:  Consumo de combustible,                   [Vector Vx3].
% SCG:  Costo Social de los gases de combustión,   [Vector 1xE].
% psiA: Tasa de emisión de gases,                 [Vector VxE].
% psiD: Tasa de emisión de gases,                 [Vector VxE].
% psiI: Tasa de emisión de gases,                 [Vector VxE].
% xm:   Distancia viajada,                         [Escalar].
% HLV:  Vector con % de HV y % de LV,              [Vector 1xV = [HV
LV]].
% f:    Factor de ajuste para vehículos            [Vector 2x2]
% pa:   Coeficientes de la ecuación de aa         [Vector]
% pd:   Coeficientes de la ecuación de ad         [Vector]
% PWR:  Power Weight Ratio                        [Escalar]
% Gr:   Grado de aproximación                     [Escalar]
% GWP:  Global-Warming Potencial                  [Vector 1xE]
% Vi:   Velocidad Inicial de los vehículos        [Escalar]
% Vfinal: Velocidad Final de los vehículos        [Escalar]
%-----
% v=1   corresponde a vehículos pesados
% v=2   corresponde a vehículos ligeros
%-----
% e=1   corresponde al gas CO
% e=2   corresponde al gas HC
% e=3   corresponde al gas NOx
%-----
k=0.5;
AT=4;
VT=9.432*(1/3600); %$/s
OR=[1.2 1.3];
PHF=0.92;
ECG=25*(1/1000000); % $/g
tao=[1.33 1.17 0.259 ; 0.5028 0.4342 0.0714]; % [HV LV], [Aceleration
Deceleration Iddling]
psiA = [0.6969 0.6383 0.3100; 0.4972 0.6321 0.5847]; % g/s, [CO HC
NOx]
psiD = [0.6534 0.6941 0.2628; 0.1365 0.2488 0.4127]; % g/s, [CO HC
NOx]
```



```

psiI = [0.7065 0.2279 0.2326; 0.3720 0.2343 0.0991]; % g/s, [CO HC
NOx]
OC=[7.25*(1/3.7854118)*(1/1000)*(1/0.68)
7.25*(1/3.7854118)*(1/1000)*(1/0.68)];
HLV=[0.02 0.98];
f=[1.4 1.4; 1.6 1.6]; % [fa; fd]
pa=[0.90 0.002 0.0023 0.15000 0.04200 0.1260; 2.08 0.127 0.0182 0 0
0]; % [HV; LV]
pd=[1.63 0.000 0.0164 0.00182 0.00622 0.0666; 1.71 0.238 0.0090 0 0
0]; % [HV; LV]
PWR=11.8;
Gr=1;
GWP=[3 12 40];
Vi=30/0.62; % km/h
Vfinal=0; % km/h
%-----
%-----
N=floor(3600*Tf/min(COo(:,1),COF(:,1)));
%-----
%-----
Vdijmv=zeros(N,1);
VSC=zeros(N,1);
VMinX=zeros(N,1);
VMinY=zeros(N,1);
VMinZ=zeros(N,1);
Resultados=zeros(N,6);
Vnadd=zeros(3,N);
U=1:N;
for n=1:N
%-----
%-----
DimVo=size(Vo);
DimOR=size(OR);
DimGWP=size(GWP);
%-----
%-----
J=n+2;
I=(1/3)*DimVo(1);
M=DimVo(2);
V=DimOR(2);
E=DimGWP(2);
%-----
%-----
fo=flow(1,:);
%-----
%-----
main=flow(2,:);
side=flow(3,:);
%-----
%-----
left=flow(4,:);
through=flow(5,:);
right=flow(6,:);
%-----
%-----
WB=flow(7,:);
EB=flow(8,:);
%-----
%-----
SB=flow(9,:);

```



```

NB=flow(10,:);
%-----
----
[qq]=flujo_V03(fo, main, side, left, through, right, WB, EB, SB,
NB, I, M, PHF);
%-----
----
DimCOo=size(COo);
%-----
----
% Valores de g, X, S, C y Offset antes de la transición.
go=Vo(1:I,:);
Xo=Vo(I+1:2*I,:);
So=Vo(2*I+1:3*I,:);
Co=COo(:,1);
Oo=COo(:,2);
%-----
----
% Valores de g, X, S, C y Offset después de la transición.
gf=Vf(1:I,:);
Xf=Vf(I+1:2*I,:);
Sf=Vf(2*I+1:3*I,:);
Cf=COf(:,1);
Of=COf(:,2);
%-----
----
% Valores DELTA de g, X, S, C y Offset.
dg=(gf-go)/n;
dS=(Sf-So)/n;
dq=(qf-qq)/n;
%-----
----
% Contrucción de la matriz Cij.
C=zeros(I,J);
Cb=zeros(I,J);
%-----
----
Tfs=Tf*(3600).*ones(I,1); % Conversión de Tf de horas a segundos.
%-----
----
O=zeros(I,J);
O(:,1)=Oo;
O(:,J)=Of;
%-----
----
C=zeros(I,J);
C(:,1)=Co;
C(:,J)=Cf;
%-----
----
for i=1:I
SUMAdO=0;
SUMAdC=0;
    for j=2:J-1
        dO=floor((Of(i)-Oo(i)-SUMAdO)/(n-j+2));%offset
        SUMAdO=SUMAdO+dO;
        Oij=O(i,j-1)+dO;
        O(i,j)=Oij;
    end
end
%-----
----

```



```

dC=floor((Cf(i)-Co(i)-SUMAdC)/(n-j+2));
SUMAdC=SUMAdC+dC;
Cij=C(i,j-1)+dC;
C(i,j)=Cij;
end
end
%-----
-----
SumC=C(:,2);
for j=3:J-1
    SumC=SumC+C(:,j);
end
SumC;
if Tfs>SumC
    Delta=Tfs-SumC;
    nadd=floor(Delta./Cf);
    nfrac=Delta./Cf-nadd;
else
    nadd=zeros(I,1);
    nfrac=zeros(I,1);
end
nadd;
nfrac;
Vnadd(:,n)=nadd;
%-----
-----
Cmuda=zeros(I,J+nadd);
Cmuda(1:I,1:J)=C;
for j=J+1:J+nadd
    Cmuda(:,j)=Cf';
end
C=Cmuda;
C;
%-----
-----
% Contadores
contador=0;
contador2=0;
contador3=0;
contador4=0;
%-----
-----
% Matrices de resultados
for i=1:I
    Mgijm = zeros((J+nadd(i))*I+1, M+2, V, E);
    Mqijmv = zeros((J+nadd(i))*I+1, M+2, V, E);
    MXijm = zeros((J+nadd(i))*I+1, M+2, V, E);
    Md1 = zeros((J+nadd(i))*I+1, M+2, V, E);
    Md2 = zeros((J+nadd(i))*I+1, M+2, V, E);
    Md = zeros((J+nadd(i))*I+1, M+2, V, E);
    MDijmv = zeros((J+nadd(i))*I+1, M+2, V, E);
    MCij = zeros((J+nadd(i))*I+1, M+2, V, E);
    Mgc = zeros((J+nadd(i))*I+1, M+2, V, E);
    Mdeltaq = zeros((J+nadd(i))*I+1, M+2, V, E);
    Mq = zeros(I,J+nadd(i),M,V,E);
end
%-----
-----
Sumqijmv=0;
Sumd1=0;

```



```

Sumd2=0;
SumD=0;
SumMinX=0;
SumMinY=0;
SumMinZ=0;
%-----
-----
g=zeros(I,J,M);
g(:,1,:)=go;
g(:,J,:)=gf;
%-----
-----
for i=1:I
    SUMAdg=0;
    contador4=contador4+1;
    for j=1:J+nadd(i)
        contador3=contador3+1;
        for mu=1:M
            contador2=contador2+1;
            for v=1:V
                for e=1:E
                    %-----
                    -----
                    contador=contador+1;
                    estado=[contador j i mu v e];
                    %-----
                    -----
                    if j==1
                        Cij=Co(i,1);
                        gijm=go(i,mu);
                        qijm=qo(i,mu);
                        Sijm=So(i,mu);
                        Xijm=Xo(i,mu);
                    elseif j>=J
                        Cij=Cf(i,1);
                        gijm=gf(i,mu);
                        qijm=qf(i,mu);
                        Sijm=Sf(i,mu);
                        Xijm=Xf(i,mu);
                    else
                        Cij=C(i,j);
                        gijm=go(i,mu)+floor((j-1)*dg(i,mu));
                        qijm=qo(i,mu)+(j-1)*dq(i,mu);
                        Sijm=So(i,mu)+(j-1)*dS(i,mu);
                        Xijm=(qijm.*Cij)./(Sijm.*gijm);
                    end
                    qijm;
                    qijmv=round(HLV(v).*qijm);
                    Mq(i,j,mu,v,e)=qijmv;
                    %Sumqijmv=Sumqijmv+qijmv;
                    if j==1
                        Sumqijmv=Sumqijmv+qijmv;
                    else
                        Sumqijmv=Sumqijmv+Mq(i,j,mu,v,e)-Mq(i,j-
1,mu,v,e);
                    end
                    %-----
                    -----
                    Qijm=Sijm.*gijm./Cij;
                    %-----
                    -----
                    if Xijm<1

```



```

        l=1-0.91.*(Xijm)^2.68;
else
    l=0.090;
end
%-----
gc=gijm/Cij;
%-----
ORv=OR(v);
%-----
OCv=OC(v);
%-----
GWPe=GWP(e);
%-----
XOijm=0.67+Sijm.*(gijm/600);
%-----
zm=Xijm-1;
%-----
% Cálculo de NOijm
if Xijm>XOijm
    NOijm=0.25*Qijm.*Tf.*(zm+sqrt(zm^2+(12.*(Xijm-
XOijm))/(Qijm.*Tf)));
else
    NOijm=0;
end
%-----
uijm=gc;
%-----
yijm=qijm./Sijm;
%-----
% Cálculo de hijm
hijm=0.9*((1-uijm)./(1-
yijm))+(NOijm./(qijm.*Cij));
%-----
%-----
% Cálculo de d1.
num=0.5.*Cij*(1-gijm/Cij)^2;
den=1-(min(1,Xijm).*gijm/Cij);
d1=num./den;
Sumd1=Sumd1+d1;
%-----
%-----
% Cálculo de d2.
d2=900*Tf*((Xijm-1)+sqrt((Xijm-1)^2+((8*k*1*Xijm)/(Qijm*Tf))));
Sumd2=Sumd2+d2;
%-----
%-----
% Cálculo de d3.
d3=0;
%-----
%-----
%-----
% Cálculo de PF.
if AT==1
    PF=17.917.*gc^4-22.509.*gc^3+12.546.*gc^2-
1.9788.*gc+1.2115;
end

```



```

                                if AT==2
                                PF=7.9167.*gc^4-9.713.*gc^3+5.3458.*gc^2-
0.7882.*gc+1.016;
                                end

                                if AT==3
                                PF=1;
                                end

                                if AT==4
                                PF=-22.083.*gc^4+36.62.*gc^3-
24.554.*gc^2+6.6084.*gc+0.403;
                                end

                                if AT==5
                                if gc<0.6;
                                PF=-5.9167.*gc^3+3.5929.*gc^2-
1.8801.*gc+1.113;
                                else
                                PF=0;
                                end
                                end

                                if AT==6
                                if gc<0.5;
                                PF=-6.*gc^3+4.45.*gc^2-1.875.*gc+1.075;
                                else
                                PF=0;
                                end
                                end

% -----
% -----
% Cálculo de Dijmv.
d=d1.*PF + d2 + d3;
if j==1
    Dijmv=qijmv.*d;
else
    Dijmv=(Mq(i,j,mu,v,e)-Mq(i,j-1,mu,v,e)).*d;
end
SumD=SumD+Dijmv;
% -----
% -----

                                %Vfinal=V(2);
                                %Vi=V(1);
% -----
% -----

                                if v==1 % HV

aa=f(1,v)*(pa(v,1)+pa(v,2)*PWR*sqrt(abs(Vfinal-
Vi))+sqrt(PWR)*(pa(v,4)-pa(v,3)*Vi)-
(pa(v,5)*sqrt(Vfinal)+pa(v,6)*Gr)/PWR);
                                else % LV
                                aa=f(1,v)*(pa(v,1)+pa(v,2)*sqrt(abs(Vfinal-
Vi))-pa(v,3)*Vi);
                                end

```



```

da=abs (Vfinal-Vi) ./aa;
%-----
-----
        if v==1 % HV
ad=f (2, v) * (pd (v, 1)+pd (v, 2) *PWR*sqrt (abs (Vfinal-
Vi)) +sqrt (PWR) * (pd (v, 4) -pd (v, 3) *Vi) -
(pd (v, 5) *sqrt (Vfinal) +pd (v, 6) *Gr) /PWR);
        else % LV
            ad=f (2, v) * (pd (v, 1)+pd (v, 2) *sqrt (abs (Vfinal-
Vi)) -pd (v, 3) *Vi);
        end
        dd=abs (Vfinal-Vi) ./ad;
        di=d-da-dd;
%-----
%-----
% Cálculo de FCijmv
fc=tao (v, 3) *di+tao (v, 1) *da+tao (v, 2) *dd;
if j==1
    FCijmv=hijm.*qijmv.*fc;
else
    FCijmv=hijm.* (Mq (i, j, mu, v, e) -Mq (i, j-1, mu, v, e)) .*fc;
end
%-----
-----
% Cálculo de GEijmve
ge=psiI (v, e) *di+psiA (v, e) *da+psiD (v, e) *dd;
if j==1
    GEijmve=hijm.*qijmv.*ge;
else
    GEijmve=hijm.* (Mq (i, j, mu, v, e) -Mq (i, j-1, mu, v, e)) .*ge;
end
%-----
-----
MinX=VT.*ORv.*Dijmv;
SumMinX=SumMinX+MinX;
%-----
-----
MinY=OCv.*FCijmv;
SumMinY=SumMinY+MinY;
%-----
-----
MinZ=ECG*GWPe.*GEijmve;
SumMinZ=SumMinZ+MinZ;
%-----
%-----
%----- ORGANIZACIÓN DE LOS DATOS -----
%-----
% Organizando los datos de gijm.
Mgijm (1, :, v, e)=[0 0 1 2 3 4 5 6 7 8]; % movimientos
Mgijm (contador3+1, 1:2, v, e)=[j i]; % i y j
Mgijm (contador3+1, mu+2, v, e)=gijm;
%-----
% Organizando los datos de qijm.
Mqijmv (1, :, v, e)=[0 0 1 2 3 4 5 6 7 8]; % movimientos
Mqijmv (contador3+1, 1:2, v, e)=[j i]; % i y j
Mqijmv (contador3+1, mu+2, v, e)=qijmv;

```



```

%-----
% Organizando los datos de Xijm.
MXijm(1, :, v, e)=[0 0 1 2 3 4 5 6 7 8]; % movimientos
MXijm(contador3+1, 1:2, v, e)=[j i]; % i y j
MXijm(contador3+1, mu+2, v, e)=Xijm;
%-----
% Organizando los datos de d1.
Md1(1, :, v, e)=[0 0 1 2 3 4 5 6 7 8]; % movimientos
Md1(contador3+1, 1:2, v, e)=[j i]; % i y j
Md1(contador3+1, mu+2, v, e)=d1;
%-----
% Organizando los datos de d2.
Md2(1, :, v, e)=[0 0 1 2 3 4 5 6 7 8]; % movimientos
Md2(contador3+1, 1:2, v, e)=[j i]; % i y j
Md2(contador3+1, mu+2, v, e)=d2;
%-----
% Organizando los datos de d.
Md(1, :, v, e)=[0 0 1 2 3 4 5 6 7 8]; % movimientos
Md(contador3+1, 1:2, v, e)=[j i]; % i y j
Md(contador3+1, mu+2, v, e)=d;
%-----
% Organizando los datos de Dijmv.
MDijmv(1, :, v, e)=[0 0 1 2 3 4 5 6 7 8]; % movimientos
MDijmv(contador3+1, 1:2, v, e)=[j i]; % i y j
MDijmv(contador3+1, mu+2, v, e)=Dijmv;
%-----
% Organizando los datos de Cij.
MCij(1, :, v, e)=[0 0 1 2 3 4 5 6 7 8]; % movimientos
MCij(contador3+1, 1:2, v, e)=[j i]; % i y j
MCij(contador3+1, mu+2, v, e)=Cij;
%-----
% Organizando los datos de gc.
Mgc(1, :, v, e)=[0 0 1 2 3 4 5 6 7 8]; % movimientos
Mgc(contador3+1, 1:2, v, e)=[j i]; % i y j
Mgc(contador3+1, mu+2, v, e)=gc;
%-----
% Organizando los datos de delta q.
Mdeltaq(1, :, v, e)=[0 0 1 2 3 4 5 6 7 8]; % movimientos
Mdeltaq(contador3+1, 1:2, v, e)=[j i]; % i y j
if j==1
    Mdeltaq(contador3+1, mu+2, v, e)=qijmv;
else
    Mdeltaq(contador3+1, mu+2, v, e)=Mq(i, j, mu, v, e)-Mq(i, j-1, mu, v, e);
end
%-----
                                end
                            end
                        end
                    end
                end
            end
        end
    end
end
%-----
dlijm=Sumd1/(V*E);
%-----
d2ijm=Sumd2/(V*E);
%-----
dijmv=SumD/Sumqijmv;
Vdijmv(n, 1)=dijmv;
%-----
SC=SumMinX/E+SumMinY/E+SumMinZ;
VSC(n, 1)=SC;

```



```

%-----
VMinX(n,1)=SumMinX/E;
VMinY(n,1)=SumMinY/E;
VMinZ(n,1)=SumMinZ;
%-----
if n==1
    Mgijm;
    Mqijmv;
    Mq;
    Md;
    MDijmv;
    Mdeltaq;
end
%-----
end
Resultados(:,1)=U;
Resultados(:,2)=Vdijmv;
Resultados(:,3)=VMinX;
Resultados(:,4)=VMinY;
Resultados(:,5)=VMinZ;
Resultados(:,6)=VSC;
%-----
Vdijmv;
Resultados;
Vnadd;
%figure(1)
%plot(U,Vdijmv,'.-')
%figure(2)
%plot(U,VSC,'.-')
end

```





Anexo 3
CÓDIGO PYTHON MODELACIÓN Y OPTIMIZACIÓN TRANSICIÓN



```

import numpy as np

import scipy.optimize as scy

import math

class Solution:

    num_cal = 0
    bag = []
    p = dict()

    def __init__(self, n, exp_g, exp_c):
        self.n = n
        self.exp_c = exp_c
        self.exp_g = exp_g
        self.error = False
        if self.exp_c < 0:
            self.exp_c = 1 / math.fabs(self.exp_c)
        if self.exp_g < 0:
            self.exp_g = 1 / math.fabs(self.exp_g)
        # print "calculando: f(", n, ", ", exp_c, ", ", exp_g, ")"
        self.calculate_transitions()

    @staticmethod
    def set_values(values):
        for key, value in values.items():
            Solution.p[key] = value

    @staticmethod
    def fix_interception(gbefore, Csum, gfinal):
        dim = gbefore.shape

```



```

gnew = np.copy(gbefore)

remain = Csum

direction = False

k_index = np.random.random_integers(0, dim[0] / 2 - 1)

avoid_inf_bucle = 0

while np.sum(gnew[0:dim[0]/2]) < remain:

    if gnew[k_index] < gfinal[k_index]:

        gnew[k_index] += 1

        avoid_inf_bucle = 0

    else:

        avoid_inf_bucle += 1

    if k_index == dim[0] / 2 - 1:

        direction = False

    if k_index == 0:

        direction = True

    if direction:

        k_index += 1

    else:

        k_index -= 1

    if avoid_inf_bucle > dim[0]:

        break

k_index = np.random.random_integers(dim[0] / 2, dim[0] - 1)

while np.sum(gnew[dim[0]/2:dim[0]]) <= remain:

    if gnew[k_index] < gfinal[k_index]:

        gnew[k_index] += 1

        avoid_inf_bucle = 0

    else:

        avoid_inf_bucle += 1

    if k_index == dim[0] - 1:

        direction = False

```



```

if k_index == dim[0] / 2:
    direction = True
if direction:
    k_index += 1
else:
    k_index -= 1
if avoid_inf_bucle > dim[0]:
    break
return gnew

```

@staticmethod

```
def set_trans_parameters(flow, Vo, Vf, COo, COf):
```

```

    Solution.p[u'flow'] = flow
    Solution.p[u'Vo'] = Vo
    Solution.p[u'Vf'] = Vf
    Solution.p[u'COo'] = COo
    Solution.p[u'COf'] = COf

```

@staticmethod

```
def calculate_flow():
```

```

    # parameters
    PHF = 0.92
    # create locals
    flow = Solution.p[u'flow']
    Vo = Solution.p[u'Vo']
    Vf = Solution.p[u'Vf']
    COo = Solution.p[u'COo']
    COf = Solution.p[u'COf']
    #variables
    fo = np.array([flow[0, :]])

```



```

main = flow[1, :]
side = flow[2, :]
left = flow[3, :]
through = flow[4, :]
right = flow[5, :]
WB = flow[6, :]
EB = flow[7, :]
SB = flow[8, :]
NB = flow[9, :]

dim_fo = fo.shape
P = dim_fo[1]

DimVo = Vo.shape
I = int((1 / 3.0) * DimVo[0])
M = DimVo[1]

Coef = np.zeros((4 * I, 4 * I, P))
R = np.zeros((4 * I, 1, P))
TI = np.zeros((1, 4 * I, P))
RI = np.zeros((I, 4 * I, P))
CB = np.zeros((2 * I - 2, 4 * I, P))
VE = np.zeros((I + 1, 4 * I, P))

for p in range(P):
    for i in range(1, I + 1):
        if i == 1:
            TIn = np.array([[1, 1, 0, 1]])
            TI[:, 0: 4, p] = TIn
        elif i == I:
            TIn = np.array([[1, 1, 1, 0]])
            TI[:, 4 * i - 4: 4 * i, p] = TIn
        else:
            TIn = np.array([[1, 1, 0, 0]])

```



```

    TI[:, 4 * i - 4: 4 * i, p] = TIn
    RIn = np.array([[main[p], main[p], -side[p], -side[p]])
    RI[j - 1, 4 * i - 4: 4 * i, p] = RIn
for p in range(P):
    for i in range(1, int((2 * l - 2) / 2.0) + 1):
        CBiw = np.array([[left[p], right[p], 0, through[p], 0, 0, 0, -1]])
        CB[i - 1, 4 * i - 4: 4 * i + 4, p] = CBiw
    for i in range(1, int((2 * l - 2) / 2.0) + 1):
        CBie = np.array([[0, 0, -1, 0, right[p], left[p], through[p], 0]])
        CB[i - 1 + (2 * l - 2) / 2.0, 4 * i - 4: 4 * i + 4, p] = CBie
for p in range(P):
    for i in range(1, l + 2):
        if i == l + 1:
            VEnw = np.array([[0, 0, 0, WB[p]])
            VE[i - 1, 0: 4, p] = VEnw
            VEne = np.array([[0, 0, -EB[p], 0]])
            VE[i - 1, 4 * l - 4: 4 * l, p] = VEne
        else:
            VEn = np.array([[NB[p], -SB[p], 0, 0]])
            VE[i - 1, 4 * i - 4: 4 * i, p] = VEn
for p in range(P):
    R[0, :, p] = fo[0, p]
for p in range(P):
    Coef[0, :, p] = TI[:, :, p]
    Coef[1: l + 1, :, p] = RI[:, :, p]
    Coef[1 + l: 3 * l - 1, :, p] = CB[:, :, p]
    Coef[3 * l - 1: 4 * l, :, p] = VE[:, :, p]
vt_before = np.round(np.linalg.inv(Coef[:, :, 0]) * R[:, :, 0].T)[:, 0]
v_before = np.round(np.array([left[0] * vt_before, through[0] * vt_before, right[0] *
vt_before]) / PHF).T
vt_after = np.round(np.linalg.inv(Coef[:, :, 1]) * R[:, :, 1].T)[:, 0]

```



```

v_after = np.round(np.array([left[1] * vt_after, through[1] * vt_after, right[1] * vt_after]) /
PHF).T

q_before = np.array([v_before[:, 0], v_before[:, 1] + v_before[:, 2]]).T

dim_qb = q_before.shape

qo = np.zeros((l, M))

for j in range(0, dim_qb[0], 4):
    for k in range(dim_qb[1]):
        if k == 0:
            qo[0.25 * j + 0.75, 2] = q_before[j, k]
        else:
            qo[0.25 * j + 0.75, 7] = q_before[j, k]
    for j in range(1, dim_qb[0], 4):
        for k in range(dim_qb[1]):
            if k == 0:
                qo[0.25 * j + 0.5, 6] = q_before[j, k]
            else:
                qo[0.25 * j + 0.5, 3] = q_before[j, k]
    for j in range(2, dim_qb[0], 4):
        for k in range(dim_qb[1]):
            if k == 0:
                qo[0.25 * j + 0.25, 4] = q_before[j, k]
            else:
                qo[0.25 * j + 0.25, 1] = q_before[j, k]
    for j in range(3, dim_qb[0], 4):
        for k in range(dim_qb[1]):
            if k == 0:
                qo[0.25 * j, 0] = q_before[j, k]
            else:
                qo[0.25 * j, 5] = q_before[j, k]

q_after = np.array([v_after[:, 0], v_after[:, 1] + v_after[:, 2]]).T

dim_qa = q_after.shape

```



```

qf = np.zeros((I, M))
for j in range(0, dim_qa[0], 4):
    for k in range(dim_qa[1]):
        if k == 0:
            qf[0.25 * j + 0.75, 2] = q_after[j, k]
        else:
            qf[0.25 * j + 0.75, 7] = q_after[j, k]
    for j in range(1, dim_qa[0], 4):
        for k in range(dim_qa[1]):
            if k == 0:
                qf[0.25 * j + 0.5, 6] = q_after[j, k]
            else:
                qf[0.25 * j + 0.5, 3] = q_after[j, k]
    for j in range(2, dim_qa[0], 4):
        for k in range(dim_qa[1]):
            if k == 0:
                qf[0.25 * j + 0.25, 4] = q_after[j, k]
            else:
                qf[0.25 * j + 0.25, 1] = q_after[j, k]
    for j in range(3, dim_qa[0], 4):
        for k in range(dim_qa[1]):
            if k == 0:
                qf[0.25 * j, 0] = q_after[j, k]
            else:
                qf[0.25 * j, 5] = q_after[j, k]
Solution.p[u'qo'] = qo
Solution.p[u'qf'] = qf

def calculate_transitions(self):
    Solution.num_cal += 1

```



```

# main parameters

n = self.n # managed by opt. algorithm

exp_c = self.exp_c # managed by opt. algorithm

exp_g = self.exp_g # managed by opt. algorithm

# create locals

qo = Solution.p[u'qo']

qf = Solution.p[u'qf']

Vo = Solution.p[u'Vo']

Vf = Solution.p[u'Vf']

COo = Solution.p[u'COo']

COf = Solution.p[u'COf']

Tf = Solution.p[u'Tf']

K = Solution.p[u'K']

AT = Solution.p[u'AT']

VT = Solution.p[u'VT']

OR = Solution.p[u'OR'] [0]

ECG = Solution.p[u'ECG']

tao = Solution.p[u'tao']

psiA = Solution.p[u'psiA']

psiD = Solution.p[u'psiD']

psil = Solution.p[u'psil']

OC = Solution.p[u'OC'] [0]

HLV = Solution.p[u'HLV'] [0]

f = Solution.p[u'f']

pa = Solution.p[u'pa']

pd = Solution.p[u'pd']

PWR = Solution.p[u'PWR']

Gr = Solution.p[u'Gr']

GWP = Solution.p[u'GWP'] [0]

Vi = Solution.p[u'Vi']

```



```

Vfinal = Solution.p[u'Vfinal']

#initialize some other variables

Vdijmv = 0

VSC = 0

VMinX = 0

VMinY = 0

VMinZ = 0

Resultados = np.zeros(6)

DimVo = Vo.shape

DimOR = OR.shape

DimGWP = GWP.shape

J = n + 2

I = int((1 / 3.0) * DimVo[0])

M = DimVo[1]

V = DimOR[0]

E = DimGWP[0]

#more variables

go = Vo[0: I, :]

Xo = Vo[I: 2 * I, :]

So = Vo[2 * I: 3 * I, :]

Co = COo[:, 0]

Oo = COo[:, 1]

gf = Vf[0: I, :]

Xf = Vf[I: 2 * I, :]

Sf = Vf[2 * I: 3 * I, :]

Cf = COf[:, 0]

Of = COf[:, 1]

#linear interpolation

dn = np.arange(1, n + 1)

a_exp_g = (dn / float(n)) ** exp_g

```



```

a_exp_c = (dn / float(n)) ** exp_c
dq = (qf - qo) / float(n)
ds = (Sf - So) / float(n)
#more vars
Tfs = Tf * 3600 * np.ones((I, 1))
O = np.zeros((I, J))
O[:, 0] = Oo
O[:, J - 1] = Of
C = np.zeros((I, J))
CC = np.zeros(J) #C Common
dCC = np.zeros(J - 1)
C[:, 0] = Co
C[:, J - 1] = Cf
sp_l = 2 - 1 #Especial Interception with value of 2 where offset is 0
CC[0] = C[sp_l, 0]
CC[J - 1] = C[sp_l, J - 1]
for j in range(1, J - 1):
    CC[j] = np.round(CC[0] + (C[sp_l, J - 1] - C[sp_l, 0]) * a_exp_c[j - 1])
    dCC[j - 1] = CC[j] - CC[j - 1]
for i in range(I):
    O[i, 0] = Oo[i]
    for j in range(1, J - 1):
        dO = (Of[i] - Oo[i]) * a_exp_g[j - 1]
        Oij = np.round(O[i, 0] + dO)
        if j == J - 3:
            O[i, j] = Of[i]
        else:
            O[i, j] = Oij
        C[i, j] = O[i, j] - O[i, j - 1] + CC[j]
SumC = C[:, 1]

```



```

for j in range(2, J - 1):
    SumC = SumC + C[:, j]
if Tfs[0] > SumC[0]:
    Delta = Tfs.T - SumC
    nadd = np.floor(Delta / Cf).flatten(1)
else:
    nadd = np.zeros((I, 1))
Cmuda = np.zeros((I, J + nadd[0]))
Cmuda[0: I, 0: J] = C
for j in range(J + 1, J + int(nadd[0])):
    Cmuda[:, j] = Cf
C = Cmuda
#counters
contador3 = 0
for i in range(I):
    Mgiijm = np.zeros(((J + nadd[i]) * I + 1, M + 2, V, E))
    Mqijmv = np.zeros(((J + nadd[i]) * I + 1, M + 2, V, E))
    MXijm = np.zeros(((J + nadd[i]) * I + 1, M + 2, V, E))
    Md1 = np.zeros(((J + nadd[i]) * I + 1, M + 2, V, E))
    Md2 = np.zeros(((J + nadd[i]) * I + 1, M + 2, V, E))
    Md = np.zeros(((J + nadd[i]) * I + 1, M + 2, V, E))
    MDijmv = np.zeros(((J + nadd[i]) * I + 1, M + 2, V, E))
    MCij = np.zeros(((J + nadd[i]) * I + 1, M + 2, V, E))
    Mgc = np.zeros(((J + nadd[i]) * I + 1, M + 2, V, E))
    Mdeltaq = np.zeros(((J + nadd[i]) * I + 1, M + 2, V, E))
    Mq = np.zeros((I, J + nadd[i], M, V, E))
Sumqijmv = 0
Sumd1 = 0
Sumd2 = 0
SumD = 0

```



```

SumMinX = 0
SumMinY = 0
SumMinZ = 0
g = np.zeros((I, J, M))
g[:, 0, :] = go
g[:, J - 1, :] = gf

#interceptions loop
for i in range(I):
    #j loop
    for j in range(J + int(nadd[0])):
        contador3 += 1
        if 0 < j < J - 1:
            g[i, j, :] = Solution.fix_interception(g[i, j - 1, :], CC[j], gf[i, :])
    #mu loop
    for mu in range(M):
        if j == 0:
            Cij = Co[i]
            gijm = go[i, mu]
            qijm = qo[i, mu]
            Sijm = So[i, mu]
            Xijm = Xo[i, mu]
        elif j >= J - 1:
            Cij = Cf[i]
            gijm = gf[i, mu]
            qijm = qf[i, mu]
            Sijm = Sf[i, mu]
            Xijm = Xf[i, mu]
        else:
            gijm = g[i, j, mu]

```



```

Cij = C[i, j]
Sijm = So[i, mu] + (j - 1) * ds[i, mu]
qijm = qo[i, mu] + (j - 1) * dq[i, mu]
Xijm = (qijm * Cij) / (Sijm * gijm)
if (j < J):
    g[i, j, mu] = gijm
    C[i, j] = Cij
#vehicle loop
for v in range(V):
    #emision loop
    for e in range(E):
        #q, Volumen
        qijmv = np.round(HLV[v] * qijm)
        Mq[i, j, mu, v, e] = qijmv
        if j == 0:
            Sumqijmv += qijmv
        else:
            Sumqijmv += Mq[i, j, mu, v, e] - Mq[i, j - 1, mu, v, e]
        Qijm = Sijm * gijm / Cij
        if Xijm < 1:
            I = 1 - 0.91 * Xijm ** 2.68
        else:
            I = 0.090
        gc = gijm / Cij
        ORv = OR[v]
        OCv = OC[v]
        GWPe = GWP[e]
        XOijm = 0.67 + Sijm * (gijm / 600.0)
        zm = Xijm - 1
        #calculate NOijm

```



```

if Xijm > XOijm:
    NOijm = 0.25 * Qijm * Tf * (
        zm + math.sqrt(zm ** 2 + (12 * (Xijm - XOijm)) / (Qijm * Tf)))
else:
    NOijm = 0
    uijm = gc
    yijm = qijm / Sijm
    #calculate hijm, h, Stopped Vehicles
    hijm = 0.9 * (((1 - uijm) / (1 - yijm)) + (NOijm / (qijm * Cij)))
    #calculate d1
    num = 0.5 * Cij * (1 - gijm / Cij) ** 2
    den = 1 - (min(1, Xijm) * gijm / Cij)
    d1 = num / den
    Sumd1 += d1
    #calculalte d2
    d2 = 900 * Tf * (
        (Xijm - 1) + math.sqrt((Xijm - 1) ** 2 + ((8 * K * I * Xijm) / (Qijm * Tf))))
    Sumd2 += d2
    #calculate d3
    d3 = 0
    if AT == 1:
        PF = 17.917 * gc ** 4 - 22.509 * gc ** 3 + 12.546 * gc ** 2 - 1.9788 * gc +
1.2115
    if AT == 2:
        PF = 7.9167 * gc ** 4 - 9.713 * gc ** 3 + 5.3458 * gc ** 2 - 0.7882 * gc +
1.016
    if AT == 3:
        PF = 1
    if AT == 4:
        PF = -22.083 * gc ** 4 + 36.62 * gc ** 3 - 24.554 * gc ** 2 + 6.6084 * gc +
0.403

```



```

if AT == 5:
    if gc < 0.6:
        PF = -5.9167 * gc ** 3 + 3.5929 * gc ** 2 - 1.8801 * gc + 1.113
    else:
        PF = 0
if AT == 6:
    if gc < 0.5:
        PF = -6 * gc ** 3 + 4.45 * gc ** 2 - 1.875 * gc + 1.075
    else:
        PF = 0
#calculate Dijmv, d
d = d1 * PF + d2 + d3
if j == 0:
    Dijmv = qijmv * d
else:
    Dijmv = (Mq[i, j, mu, v, e] - Mq[i, j - 1, mu, v, e]) * d
SumD += Dijmv
if v == 0: #HV
    aa = f[0, v] * (
        pa[v, 0] + pa[v, 1] * PWR * math.sqrt(math.fabs(Vfinal - Vi)) +
math.sqrt(PWR) * (
            pa[v, 3] - pa[v, 2] * Vi) - (
            pa[v, 4] * math.sqrt(Vfinal) + pa[v, 5] * Gr) / PWR)
else: #LV
    aa = f[0, v] * (pa[v, 0] + pa[v, 1] * math.sqrt(math.fabs(Vfinal - Vi)) - pa[v, 2] *
Vi)
da = math.fabs(Vfinal - Vi) / aa
if v == 0: #HV
    ad = f[1, v] * (
        pd[v, 0] + pd[v, 1] * PWR * math.sqrt(math.fabs(Vfinal - Vi)) +
math.sqrt(PWR) * (

```



```

pd[v, 3] - pd[v, 2] * Vi) - (
pd[v, 4] * math.sqrt(Vfinal) + pd[v, 5] * Gr) / PWR)
else: #LV
ad = f[1, v] * (pd[v, 0] + pd[v, 1] * math.sqrt(math.fabs(Vfinal - Vi)) - pd[v, 2] *
Vi)

dd = math.fabs(Vfinal - Vi) / ad
#di, Delay Stop Per
di = d - da - dd
#calculate FCijmv
fc = tao[v, 2] * di + tao[v, 0] * da + tao[v, 1] * dd
if j == 0:
FCijmv = hijm * qijmv * fc
else:
FCijmv = hijm * (Mq[i, j, mu, v, e] - Mq[i, j - 1, mu, v, e]) * fc
#calculate GEijmve
ge = psil[v, e] * di + psiA[v, e] * da + psiD[v, e] * dd
if j == 0:
GEijmve = hijm * qijmv * ge
else:
GEijmve = hijm * (Mq[i, j, mu, v, e] - Mq[i, j - 1, mu, v, e]) * ge
MinX = VT * ORv * Dijmv
SumMinX += MinX
MinY = OCv * FCijmv
SumMinY += MinY
MinZ = ECG * GWPe * GEijmve
SumMinZ += MinZ
#gijm
Mgijm[0, :, v, e] = np.array([0, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]) #movimientos
Mgijm[contador3, 0: 2, v, e] = np.array([j, i]) #i y j
Mgijm[contador3, mu + 2, v, e] = gijm
#qijm

```



```

Mqijmv[0, :, v, e] = np.array([0, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]) #movimientos
Mqijmv[contador3, 0: 2, v, e] = np.array([j, i]) #i y j
Mqijmv[contador3, mu + 2, v, e] = qijmv
#Xijm.
MXijm[0, :, v, e] = np.array([0, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]) #movimientos
MXijm[contador3, 0: 2, v, e] = np.array([j, i]) #i y j
MXijm[contador3, mu + 2, v, e] = Xijm
#d1.
Md1[0, :, v, e] = np.array([0, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]) #movimientos
Md1[contador3, 0: 2, v, e] = np.array([j, i]) #i y j
Md1[contador3, mu + 2, v, e] = d1
#d2.
Md2[0, :, v, e] = np.array([0, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]) #movimientos
Md2[contador3, 0: 2, v, e] = np.array([j, i]) #i y j
Md2[contador3, mu + 2, v, e] = d2
#d.
Md[0, :, v, e] = np.array([0, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]) #movimientos
Md[contador3, 0: 2, v, e] = np.array([j, i]) #i y j
Md[contador3, mu + 2, v, e] = d
#Dijmv.
MDijmv[0, :, v, e] = np.array([0, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]) #movimientos
MDijmv[contador3, 0: 2, v, e] = np.array([j, i]) #i y j
MDijmv[contador3, mu + 2, v, e] = Dijmv
#Cij.
MCij[0, :, v, e] = np.array([0, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]) #movimientos
MCij[contador3, 0: 2, v, e] = np.array([j, i]) #i y j
MCij[contador3, mu + 2, v, e] = Cij
#gc.
Mgc[0, :, v, e] = np.array([0, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]) #movimientos
Mgc[contador3, 0: 2, v, e] = np.array([j, i]) #i y j

```



```

Mgc[contador3, mu + 2, v, e] = gc
#q.
Mdeltaq[0, :, v, e] = np.array([0, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]) #movimientos
Mdeltaq[contador3, 0: 2, v, e] = np.array([j, i]) #i y j
if j == 0:
    Mdeltaq[contador3, mu + 2, v, e] = qijmv
else:
    Mdeltaq[contador3, mu + 2, v, e] = Mq[i, j, mu, v, e] - Mq[i, j - 1, mu, v, e]
#end of all 5 loops
self.g = g
self.c = C
self.o = O
d1ijm = Sumd1 / (V * E)
d2ijm = Sumd2 / (V * E)
#resultado total
dijmv = SumD / Sumqijmv
Vdijmv = dijmv
SC = SumMinX / E + SumMinY / E + SumMinZ
VSC = SC
VMinX = SumMinX / E
VMinY = SumMinY / E
VMinZ = SumMinZ
Resultados[0] = n
Resultados[1] = Vdijmv
Resultados[2] = VMinX
Resultados[3] = VMinY
Resultados[4] = VMinZ
Resultados[5] = VSC
self.ox = VMinX
self.oy = VMinY

```



```
self.oz = VMinZ  
  
self.delay = Vdijmv  
  
self.sc = VSC  
  
#store up to 200 non optimal solutions  
  
#if (Solution.num_cal <= 200):  
  
#Solution.bag.append(self)  
  
print "* calculated { n: ", self.n, ", exp_c: ", self.exp_c, ", exp_g: ", self.exp_g, ", Ox: ",  
self.ox, ", Oy", self.oy, ", Oz", self.oz, " }"
```