



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE INGENIERÍA

EL USO DE LA SIMULACION PARA MEJORAR EL SISTEMA  
DE SEMAFORIZACION EN LA DELEGACION  
BENITO JUAREZ.

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

**I N G E N I E R O C I V I L**

**P R E S E N T A :**

**CARLOS ALBERTO NAVA FONSECA**



DIRECTOR DE TESIS: DR. RICARDO ACEVES GARCIA

MEXICO, D. F.

2004



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

ESTA TESIS NO SALE  
DE LA BIBLIOTECA



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA  
DIRECCIÓN  
FING/DCTG/085/03

Señor  
**CARLOS ALBERTO NAVA FONSECA,**  
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor DR. **RICARDO ACEVES GARCÍA**, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

**"EL USO DE LA SIMULACIÓN PARA MEJORAR EL SISTEMA DE SEMAFORIZACIÓN  
EN LA DELEGACIÓN BENITO JUÁREZ"**

- I. INTRODUCCIÓN
- II. ANTECEDENTES
- III. LA METODOLOGÍA DE LA SIMULACIÓN
- IV. SIMULACIÓN CON SYNCHRO
- V. CASO DE ESTUDIO
- VI. ANÁLISIS Y RESULTADOS
- VII. CONCLUSIONES

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente  
**"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"**  
Cd. Universitaria, D.F., a 26 de agosto de 2003.  
EL DIRECTOR

  
M.C. GERARDO FERRANDO BRAVO

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: Nava Fonseca Carlos

Alberto 25

FECHA: 25-feb-04

FIRMA: 

GFB/AJP/ser

## **Agradecimientos**

Quisiera agradecer a mi familia por su apoyo y paciencia todo este tiempo que he estado con ellos. En especial a mi madre por su consejo y experiencia, y mi hermana por su eterno sarcasmo que me ayuda a seguir adelante y ver otro enfoque.

También agradezco a la banda en general por los días y noches sin excusa o con ella para pasar el tiempo haciendo algo o nada, (y sin algún orden en especial) a Arturo, el "Número" por predicar; a Humberto por su locura y compañerismo, a el "Compa", por todo lo hecho conjuntamente desde el 127, al "Indy-man" por su estrambótica forma de ver la realidad. A Rulo por ponerle lugar a la banda y lo compartido durante la carrera. Al "Chosto" por su hilaridad. Al "Huico" por ser un huico de huicotlan. Y a "Lord Marcus" por su sapiencia y conocimiento en muchas áreas.

Además a la banda de rol, Alexis "Prometeo" por su necedad y perspectiva. A "Lester Chakyn" por los miles de frags. A "Maduna" por su iluminación y insensatez conjunta. Y a Paquito Mota, por su neurosis y pragmatismo.

Finalmente a aquellos con los que me dieron el impulso final para realizar este trabajo, Doctor Aceves, por su conocimiento y guía; a Mayra por sus clases y ayuda. A "Erubas" por la competencia sostenida. Y a todos que en mayor o menor grado estuvieron ahí por alguna y otra razón y pasamos momentos juntos.

A quien me dio la vida, y  
quien me inspiró.

# INDICE

	Pag.
Introducción	1
1. Antecedentes	4
1.1 El problema del tránsito	4
1.2 Ingeniería de tránsito	5
1.2.1 La toma de decisiones	7
1.2.1.1 Información, planeación y toma de decisiones	7
1.2.1.2 El proceso de planeación y toma de decisiones	8
1.2.2 Planeación de los sistemas viales	9
1.2.3 Política de las opciones y control	10
1.2.4 Estadística y tipo de datos	11
1.3 Dispositivos de control	13
1.3.1 Funcionamiento de los dispositivos de control	13
1.3.2 Propiedades de los dispositivos de control	14
1.3.3 Clasificación de los dispositivos de control	14
1.3.4 Los semáforos	15
1.3.4.1 Ventajas y Desventajas	16
1.3.4.2 Tipos de semáforos	16
1.3.4.3 Operación generalizada de un cruceo	17
1.4 Mantenimiento de la señalización	18
2. La metodología de la simulación	19
2.1 La simulación como herramienta	19
2.2 El proceso de la simulación	19
2.2.1 Principios de simulación	20
2.2.2 Justificación de la simulación	21
2.2.3 El tráfico como un objeto de simulación	22
2.3 La simulación del tráfico	22
2.4 Macro simulación y micro simulación	24
2.4.1 La macro simulación de Synchro	24
2.4.2 La micro simulación de SimTraffic	25
3. Simulación con Synchro	28
3.1 El proceso de optimización con Synchro	28
3.1.1 Optimización de los intervalos de las intersecciones	30
3.1.1.1 Optimización por percentiles	30
3.1.1.2 Reglas adicionales a la optimización	30
3.1.2 Optimización de la longitud del ciclo	31
3.1.3 Optimización de las compensaciones	33
3.1.4 Particiones de la red	33

3.2 Los Modelos de Optimización	34
3.2.1 Factor de Coordinación	34
3.2.1.1 Distancia entre intersecciones	34
3.2.1.2 Promedio de Tráfico	35
3.2.1.3 Pelotones de tráfico	35
3.2.1.4 Volumen de tránsito	36
3.2.1.5 Longitud de Ciclos	37
3.2.2 Modelos de Retraso	37
3.2.2.1 La Fórmula de Webster	38
3.2.2.2 El Método de Percentiles de Retraso	39
3.2.3 Modelos de sobrecapacidad	43
3.2.4 Algoritmo de cálculo de los retrasos percentiles	46
3.2.5 Cálculo de los altos	47
3.2.6 Cálculo de la Longitud de Cola y Penalización de la Cola	47
3.2.6.1 Longitud de Cola	47
3.2.6.2 Penalización de la cola	50
3.3 Consideraciones y Modelos de SimTraffic	51
3.3.1 Modelos de SimTraffic	52
3.3.1.1 Generación de Tráfico y Asignación de rutas	52
3.3.1.1.1 Generación de viajes	53
3.3.1.1.2 Generación de Rutas	53
3.3.1.2 Seguimiento y Selección de Velocidad	54
3.3.1.3 Cambios de carril	57
3.3.1.4 Operación de semáforos con tiempo fijo	58
4. Caso de estudio	60
4.1 Características de la Delegación Benito Juárez	60
4.1.1 Geografía de la Delegación	60
4.1.2 Economía de la zona	60
4.1.3 Infraestructura de la Delegación	61
4.1.4 Uso de suelo y vivienda	62
4.1.5 Justificación de la zona	63
4.2 Datos Utilizados para realizar la simulación	64
4.3 Construcción del modelo de simulación	65
4.3.1 Formulación del problema	65
4.3.2 Objetivos	66
4.3.3 Recolección de Datos	66
4.3.4 Construcción del modelo	66
4.3.5 Validación de la Simulación	68
4.4 Diagnóstico de la situación actual	70
4.5 Diseño de experimentos	73
5. Análisis y Resultados	75



5.1 Resultados de las alternativas	75
5.2 Propuesta de nuevas fases	75
5.2.1 Detalle de las corridas	75
5.3 Comparación de las alternativas	77
Conclusiones y Recomendaciones	80
Anexos	81
Bibliografía	99

## Introducción

La ingeniería de tránsito nace a partir de la necesidad de una operación eficiente de las calles y caminos, y como resultado del crecimiento de los conductores que usan la infraestructura existente.

La metodología de la simulación permite manejar situaciones inexistentes en la realidad, y con esta herramienta se pueden modelar situaciones verosímiles hasta situaciones que tengan muy poca probabilidad de aparición. Estas situaciones se conocen como escenarios, que permiten resolver problemas, realizar investigación o conducen experimentos, con el fin de buscar una mejora del sistema modelado.

El modelado a través de la simulación se requiere en el tráfico, dado que los métodos analíticos conocidos y probados, son imposibles de utilizar; o sus limitantes son tan grandes que no proporcionan resultados que semejen la realidad. Al intentar formular un modelo matemático, como lo es el análisis del tráfico, donde hay muchas variables que dependen del comportamiento humano, su percepción, etc. se recurre a un recurso alternativo, realizar simulaciones para representar en el mayor grado posible el fenómeno que ocurre en la realidad.

Para usar la simulación se requiere de una metodología y de un conjunto de herramientas matemáticas, como lo es la estadística y de herramientas de cómputo para modelar el tráfico. También crear o usar un modelo que tenga un comportamiento similar al real en los aspectos que queremos analizar, además de que por concepto de parsimonia sea sencillo y representativo.

La realización de simulaciones de tránsito mediante la aplicación de un software específico de análisis, permite evaluar con precisión una red de tránsito, a través de modelos matemáticos dinámicos.

La visualización gráfica brindada por el software, nos permite cuantificar y calificar la magnitud de los conflictos existentes y la bondad de las soluciones propuestas, despojando del estudio, cualquier factor subjetivo de interpretación.

El programa permite la reasignación de parámetros de diseño para el estudio de alternativas o variantes que se deseen incorporar a la red en forma rápida y versátil, y al mismo tiempo los resultados obtenidos tienen la precisión y definición que la técnica exige combinada con una presentación "amigable" de los resultados, lograda de manera que puedan significar un importante recurso para la exposición del tema en ámbitos más allá de los específicamente técnicos.

Las autoridades de las principales ciudades del mundo han adoptado a los programas de simulación para realizar estudios para poder detectar sus problemas de tránsito y transporte, así como también evaluar diferentes

proyectos y comparar su funcionamiento, sin arriesgar capital ni prestigio ni vidas humanas. Lo que le permite contar hoy en día con todo el potencial de esta herramienta para el análisis de situaciones de alta complejidad y exigencia técnica.

El objetivo principal es realizar un diagnóstico del sistema apoyado en los datos de aforo, semaforización y geometría. El resultado es observar los niveles de servicio de las intersecciones y verificar su operación en un modelo de red. El propósito de este objetivo es verificar que un simulador pueda reflejar el comportamiento que se efectúa en los cruceros, no de manera puntual o como un corredor, sino que tenga un comportamiento global y de gran escala. Dada la complejidad de un fenómeno así, se probará si el simulador puede manejar una situación extrema.

El objetivo secundario se realizaría en caso de existir cruceros con bajo nivel de servicio; entonces, con base en el diagnóstico se diseñan las alternativas de solución para mejorar la agilidad vial. El propósito de este objetivo es intentar proporcionar una solución al conflicto vial sin involucrar cambios de geometría en el trazo actual de la red vial, sino que se intente proporcionar una solución basándose sólo en buscar una nueva coordinación de los semáforos existentes y proponer nuevos tiempos a los ciclos existentes para la geometría actual. Con este propósito en el cual no haya una alteración al trazo que resultaría costoso, se intenta dar una solución factible de implantación y económicamente atractiva.

El capítulo 1 abarca aspectos de la ingeniería de tránsito, y cómo el control vehicular con base en la señalización por medio de semáforos es uno de los aspectos más importantes en el sistema de transporte urbano y como este aspecto debe revisarse y actualizarse para la demanda cambiante en el tiempo.

El capítulo 2 expone a la simulación como la herramienta metodológica que ayuda a la generación de escenarios y se justifica la elección de esta herramienta para el modelado de una red de tráfico como un sistema dinámico y que varía en el tiempo, haciéndolo ideal para simular.

En el capítulo 3 se revisan los modelos matemáticos que componen el software de simulación y como estos modelos de análisis de tráfico influyen para generar una señalización óptima. Los modelos matemáticos contenidos en el software de simulación también poseen sus limitantes, y proporcionan idea de cómo se realizan las estimaciones para los datos de entrada y las respuestas esperadas a la salida del modelo.

En el capítulo 4 se da el desarrollo analítico y conceptual del caso de estudio. Su justificación, los datos utilizados, la importancia de la zona y cómo el uso de la herramienta de la simulación se acopla y refleja la situación modelada. También se realizan los pasos necesarios para diseñar las alternativas de

solución con base en los objetivos secundarios una vez que la validación de la simulación dictamina que refleja la realidad que fue modelada.

Finalmente el capítulo 5 presenta las alternativas de solución y compara contra la situación de operación las mejoras que podrían efectuarse con la propuesta de una nueva señalización. Las mejoras no sólo se ven en sectores como ahorro de tiempo y disminución de colas generadas, sino también hay una mejora ambiental en cuanto a las emisiones contaminantes y un ahorro de combustible al agilizar las arterias involucradas.

## Capítulo 1. Antecedentes

### 1.1 El problema del tránsito

Los sistemas de tráfico, idealmente proporcionan niveles de acceso fuera de recurrir a grandes costos, accidentes o deterioro al ambiente. Estos, se sustentan sobre: seguridad vial, la cual proporciona a la población menor grado de incertidumbre ante el uso de vías; congestión vial, el cual impacta en el desarrollo social y económico al proporcionar retrasos y conflictos con el ritmo de vida de la población; y el ambiente, dado que el tráfico impacta en el ambiente como contaminación del aire y de ruido afectando la salud de la población.

El papel del análisis del tráfico sirve para examinar el nivel de demanda con la infraestructura existente y determinar si puede soportar rutas alternativas para la demanda y obtener la información necesaria para que resulte fructífera su implantación, el único detalle sobre este punto son sus políticas puesto que son las más difíciles de lograrse. La ingeniería vial y la planeación de los sistemas logran que el sistema objetivo sea más confiable, detallado y completo en su composición y operación. Entonces el análisis debe hacerse frecuentemente, rápido y con un bajo costo.

El sector público, privado y la población, están interesados en el desarrollo de mejores sistemas de tráfico que proporcionen una mejor planeación y desarrollo de sus áreas específicas. El resultado es que los intereses públicos y privados encuentran una expansión de sus servicios y atraen a la población general a su interacción con ellos.

El impacto del tráfico se puede dar de muchas formas, por ejemplo, se puede considerar en términos de:

- a) Eficiencia, como accesibilidad y capacidad de movimiento.
- b) Ambiental.
- c) Comodidad.
- d) Seguridad.
- e) Transporte público y movimiento de transeúntes.
- f) Pavimentación y puentes.

La eficiencia involucra principalmente el desempeño de las arterias principales, en términos de cómo maneja los grandes volúmenes de tráfico. El impacto ambiental se refiere a la contaminación en general, ya sea como ruido, vibración e intrusión. La comodidad se refiere al uso de las vías para que la población desempeñe actividades sin la interferencia del tráfico. La seguridad engloba a todos los caminos en su calidad cualitativa y cuantitativa. El transporte público y los transeúntes son parte de los sistemas viales pero a su vez necesitan recursos especiales que se deben contemplar dentro de la ingeniería vial. Y, el

uso de las estructuras de los caminos en cualquiera de sus clases de vías, resulta de especial interés cuando se encuentran vehículos pesados dentro de nuestro sistema de estudio.

La mayoría de el control de tráfico y de los problemas de demanda, requieren el conocimiento detallado de las características del tráfico y los estudios de este mismo definen el trabajo de la ingeniería vial. El resultado de tales estudios se usarán en: la planeación, manejo, estudios económicos, control de tráfico y ambiental, seguridad vial, estudios del uso del transporte y para establecer nuevos diseños y modelos de sistemas. Así, el análisis del tráfico hace uso de varias teorías, herramientas estadísticas y modelos matemáticos; los cuales tienen que ser probados con sistemas reales de tráfico. Entonces se puede resumir la información que se necesita en:

- a) Monitoreo: es la recopilación de información de las condiciones de tráfico en cualquier momento y el cambio en el tiempo.
- b) Pronóstico: es el uso de la información de los sistemas existentes y estimar bajo diferentes condiciones el comportamiento del mismo.
- c) Calibración: es el uso de la información para estimar valores de uno o más parámetros dentro de un modelo teórico o se simulación.
- d) Validación: que es la verificación teórica o del modelo de simulación contra la información del modelo.

La información que necesita el análisis del tráfico se recolecta a varios niveles de detalle según lo que necesita el estudio, pero dentro de la información necesaria, tenemos: flujo de vehículos y peatones, el número de vehículos y peatones en espera, el número de vehículos estacionados, ocupantes por vehículo, velocidad del vehículo, tiempo de viaje, consumo de combustible y emisiones, peso de los vehículos, origen / destino.

## 1.2 Ingeniería de Tránsito

Dado el gran rango de parámetros y del detalle con que los estudios se pueden realizar, el análisis se puede presentar a un problema en particular y esto definirá el nivel de la investigación, y estos niveles son los elementos que componen el sistema que son: el camino, las intersecciones y la red vial.

### Nivel de vía

El análisis a nivel de camino representa como está el flujo de tráfico entre dos intersecciones, este flujo es unidireccional o bidireccional. El flujo de tráfico, a lo largo de un camino puede tener uno o varios carriles y diferente capacidad por carril, la primera aproximación para el análisis de la vía, es suponer un flujo ininterrumpido y el flujo depende de sus propios parámetros (como velocidad, volumen y composición) y las características físicas del mismo (como ancho, tipo de pavimento y condición), siendo independiente de factores externos (como

otras calles o uso de calle). El incremento del flujo vehicular incrementa el tiempo de recorrido en la vía, y esta suposición solo puede ser aplicada a las vías cuyos accesos y descesos sean limitados, y a que en un modelo real hay gente estacionándose, vehículos incorporándose o accediendo a estacionamientos, etc. El movimiento del tráfico a lo largo de camino y su flujo es la esencia del estudio del mismo a lo largo de su distancia y los vehículos que llenan su capacidad y flujo a lo largo de redes nos dicen que caminos son los más transitados, las rutas más importantes para la población o los accesos que la población necesita.

### Nivel de intersección

El análisis de las intersecciones es el análisis donde las vías encuentran concurrencia. En estos puntos y solo en estos puntos, el tráfico cambia de dirección en su recorrido, en cuestión de los términos de ingeniería vial se conocen como nodos, y estos son puntos de conexión entre vías. El flujo del tráfico, en estas intersecciones entra en conflicto pues los flujos de los caminos tienen que cruzarse o incorporarse entre sí. La intersección representa los puntos donde la capacidad vehicular del sistema de tráfico empieza a ser un problema, puesto que la intersección de varios flujos tiene un mismo lugar físico que es un camino y su capacidad puede ser alcanzada por la convergencia de los flujos. Las intersecciones por lo general son las que dictaminan el flujo interurbano de la capacidad de una red, a menos que durante el flujo de la vía se encuentre algún elemento que reduzca su capacidad o la amplíe (como lo sería un puente). Los problemas de congestionamiento resultan de cuellos de botella o del tráfico de una intersección, y también los problemas de seguridad en torno a las intersecciones son los mayores, puesto que el conductor tiene que lidiar con el espacio en la intersección. Y ambientalmente es donde se presenta el ruido y la generación de contaminantes durante la aceleración de arranque y frenado, a su vez de la generación de colas de vehículos en espera.

El flujo de tráfico en una intersección es un tipo de flujo interrumpido, donde los conceptos, teorías y modelos requeridos para su análisis y explicación de cómo es el comportamiento del tráfico dentro de una intersección y su desempeño necesitan de la interacción de todos los flujos convergentes, de la geometría de la intersección y las características físicas, y del control de flujo (señalización, prioridad de flujo, etc.). El régimen de control en una intersección está íntimamente ligado a su desempeño de funcionamiento, y la selección del control apropiado es donde la ingeniería vial toma su papel, pues este control define y determina, los retrasos asociados a la carga vehicular, y las colas que se generan en el cruce. El exceso de la capacidad repercute en el consumo de combustible, de emisión de gases, proporcionales a la longitud de cola generada.

## Nivel de área

Los impactos que ocasiona el tráfico por lo regular se comienzan a expandir en su proximidad, por causa de una peculiaridad de la vía o por culpa de una intersección crítica, cercana al sitio donde se genera. Los esquemas de manejo del tráfico, consideran que se debe manejar a nivel de área, o sea, como un conjunto de aglomerado de vías e intersecciones. La solución al problema del tráfico envuelve el movimiento de los patrones a lo largo del área de estudio, las rutas que los usuarios eligen y de cuales elementos de la red deseamos afectar, entonces es necesario considerar la distribución de espacio, de la cantidad de vehículos afectados, la implementación de control y los aspectos ambientales y de seguridad que conllevan.

El control vehicular que se estudia, no solo involucra el movimiento y coordinación de señales de intersecciones cercanas o la secuencia a lo largo de vías interconectadas, si no que también es necesario que en el estudio de una red exista una relación entre intersecciones mucho mayor para un mejor control y planeación de los sistemas. Las teorías de comportamiento de tráfico dependen de la descripción de flujo, los patrones del mismo, y la relación entre la operación de vías e intersecciones.

Una forma de análisis que se puede efectuar es de una red densa, que considera arterias principales, vías secundarias y el uso del área alrededor de una frontera establecida, con otra red de flujo pero solo principal. Aunque también se puede uno ir a detalle solo considerando el uso adyacente o local.

### 1.2.1 La toma de decisiones

Los sistemas de tráfico resultan complejos en su estructura y el análisis de la información para determinar su comportamiento es el fin de la investigación del sistema. Los procesos de recolección de información, análisis y la proposición de ideas necesitan ser aplicadas mediante un proceso sistemático y organizado. Las fases para lograr el estudio del tráfico, así como el análisis de la información mediante la ingeniería vial y la planeación son:

- a) Especificación de los requisitos de información.
- b) Diseño y guía de los estudios.
- c) Verificación y análisis de los estudios.
- d) Aplicación de la información de diseño y toma de decisiones.

#### 1.2.1.1 Información, planeación y toma de decisiones.

La planeación involucra la generación de propuestas alternativas y la obtención de información para ser presentada ante el tomador de decisiones, que considerará las consecuencias de las alternativas si llegan a su implantación. La información durante la fase de la planeación se verá reflejada en:



- a) El fruto y resultado de las decisiones tomadas a lo largo de la historia y los cursos de acción de sus planes.
- b) Las decisiones tomadas requieren que el decisor tenga completa conciencia de las consecuencias de corto y largo plazo de las alternativas presentadas, aún cuando sus consideraciones no tengan la suficiente fuerza de preferencia.
- c) Las decisiones que involucran la evaluación de los diferentes escenarios de las alternativas futuras, y la selección de la alternativa más factible, debe involucrar un análisis sofisticado, un proceso de evaluación y la decisión sobre las implicaciones y un esquema de valor.
- d) Las decisiones concernientes a futuras acciones están basadas en asumir consecuencias sobre las alternativas diseñadas y además debe dejar opciones a futuro.
- e) Los frutos de la planeación son diseñados pensando en que debe existir una mayor probabilidad para hacer buenas decisiones. Entonces, el proceso de planeación necesita examinar varios escenarios y considerar los fines y objetivos de las alternativas. Examinar cada implantación nos hace reconocer los problemas que están emergiendo.
- f) El resultado del proceso de planeación son sólo una parte que el decisor necesita, la utilidad de la información que sale de la planeación y el proceso de análisis de datos, sólo servirá si es entendida por el tomador de decisiones y es acompañada de las opciones a futuro que encontrará, dadas las consecuencias de las alternativas propuestas.

La planeación vial y la investigación de campo enfocada en presentar la información al tomador de decisiones, debe reconocer la capacidad que tenga en cuanto al análisis técnico de los datos y la información producida, al mismo tiempo debe contener la información solicitada por ellos, y si se cumpliera con la gama de información para entender el problema y las implicaciones, se daría un grado aceptable y desarrollo en torno a la solución que se implantará.

#### 1.1.2.2 El proceso de planeación y toma de decisiones

La solución de problemas requiere de la asignación de recursos, como tiempo, económicos y de personal. Los niveles a los que están sujetos estos recursos según su disponibilidad determinará:

- a) El tipo, la escala y el número de alternativas de solución que serán investigadas.
- b) Las cantidades y el tipo de información que será recolectada.
- c) El nivel de modelado y el análisis de información que puede ser conducido.

Bajo este esquema, el analista deberá presentar un número de alternativas que resuelva el problema en un estándar deseado, y que use las técnicas adecuadas

para predecir las consecuencias de cada una de las soluciones propuestas. Obtiene una selección de candidatos, los cuales pone sujetos a restricciones impuestas por el mismo sistema, como límite de presupuesto, aceptación social o política, implantación práctica, etc.

El proceso de planeación contiene muchos vínculos entre sus componentes internos, la evaluación determina y predice como serán las consecuencias de las posibles soluciones, contra las restricciones y los criterios actuales y pasados. Si ninguna de las propuestas pasa la prueba de nuestras restricciones y criterios entonces debe afinarse el proceso de selección de alternativas, que nos llevaría a volver a evaluar las restricciones, sobrepasar algunas y en ciertos casos volver a plantear fines y objetivos.

Y este proceso no termina con la implantación del modelo, sino que continúa monitoreando el desempeño de la alternativa elegida, que será cuando se compara contra el resultado predicho por el modelado de la información. Dichos resultados proveerán de información para técnicas de pronósticos y para plantear nuevas fronteras a los sistemas futuros.

### 1.2.2 Planeación de los sistemas viales

#### Recolección de Datos

El proceso de recolección para la planificación, debe considerar la forma en que los datos serán recolectados y como la información será procesada. Primeramente, el propósito del análisis de tráfico dentro del proceso de planeación es para proveer de información, haciendo inferencia sobre los datos. Segundo, la recolección de datos se convierten en un recurso de inversión, el cual puede ser costoso bajo las concepciones económicas, de tiempo y de trabajo, así que debe establecerse un proceso para que la recolección compagine con la información pasada y sea adecuada.

#### Modelado y análisis

Durante el proceso de modelado, se realizará la metamorfosis de datos a información concreta para el tomador de decisiones, la elección de los modelos que se usarán durante el proceso de planeación, son gobernados por los objetivos del análisis así como los recursos de que se dispongan. Estos modelos se pueden clasificar básicamente como: aquellos que modelan la demanda, la oferta y los de impacto (urbano, social, ambiental, etc.). El modelo de oferta es aquel que comprende el proceso de determinar los cambios en el uso del sistema que se encuentra en operación y las características del sistema. El modelo de demanda considera al proceso, para estimar los efectos de los cambios en las características de operación. Y estos dos modelos están relacionados por las mismas variables en un sistema recursivo donde la entrada de uno es la salida del otro.

El modelo de oferta toma las características físicas del sistema, para generar un sistema con características de operación. El modelo de demanda utiliza las características de los usuarios actuales y potenciales del sistema, y pronostica el comportamiento futuro del sistema. Luego, el modelado del sistema continúa hasta que se encuentra en un equilibrio de uso. Esta relación que mantienen estos modelos, su estructura interna y metodología, son diferentes ya que el modelo de oferta busca modelar las características entre los elementos del sistema, mientras que el modelo de demanda intenta representar el comportamiento social que tendrá la población, ante el nuevo uso del sistema físico. Las suposiciones entre los cambios y la reacción se consideran como los estimadores de consecuencias.

Se puede asumir que el impacto no afecte de inmediato la demanda, y es posible que circunde el proceso de equilibrio entre los modelos de oferta y demanda, y entonces es posible usar modelos de impacto para que se cumpla la demanda o se aumente el nivel de oferta actual.

### 1.2.3 Política de las opciones y control

Los recursos utilizados en la política de opciones deben conmensurarse con la escala del proyecto, o en particular anticipar los costos de efectuar la decisión incorrecta. El costo del proceso puede resultar fuera del presupuesto, si en una fase preliminar, no compaginan los candidatos de opciones con las políticas que hagan factible que el nuevo sistema contenga las restricciones y las fronteras específicas del problema.

Las políticas que se enfrentan contra los requisitos básicos, o aquellas que no sean factibles en términos de desempeño contra el criterio de planeación, deben pasar un filtrado, de hacerlo los recursos pueden centrarse en opciones aceptables. El análisis de sensibilidad es el que nos ayuda a definir un mejor filtrado de apreciación de opciones.

Las fronteras iniciales de la planeación revelan qué procesos y qué políticas no son apropiadas; luego, los candidatos de solución pueden afectar para el rango de factores o de impactos en escala regional, de población afectada o la escala de tiempo. Es entonces necesario realizar esta apreciación con un enfoque mucho mayor y más restringido, para evitar crecer un modelo y olvidar restricciones.

El control de las alternativas sobre el proceso de planeación sirve para medir el comportamiento del modelo implantado. Monitorear involucra seguir tomando datos y análisis. Su importancia radica en:

- a) Provee de información de la operación actual con la alternativa elegida, incluyendo los impactos negativos. La información de la operación actual

- y sus consecuencias, proporciona la base para reformular o calibrar los modelos y procedimientos de predicción de consecuencias.
- b) Revela que cambios se pueden realizar a la alternativa seleccionada para mejorar su efectividad de operación.
  - c) Alerta al analista de cómo y cuándo nuevos problemas y contratiempos comienzan a aparecer y es posible que ofrezca un mejor panorama que evite, que el problema solo sea solucionado en respuesta a una necesidad inmediata.
  - d) Promueve que los analistas comprendan a detalle el funcionamiento del sistema y consideren nuevas variables que les ayude a plantear nuevas políticas con mayor creatividad y efectividad en un futuro.

Incluir la evolución del sistema a través del monitoreo, es un proceso esencial para la práctica profesional de la planeación la cual no termina con el proceso de implementación. Los planes deben ser continuamente revisados con los cambios que tengan la población, las condiciones económicas y el desarrollo tecnológico, para una operación exitosa del nuevo sistema.

#### 1.2.4 Estadística y tipo de datos

Para los sistemas de planeación el conocimiento de la teoría estadística y sus métodos y procedimientos, ayudan a determinar que requisitos se necesitan para la captura de datos, procesos de monitoreo e investigación en estudios de tráfico. La Estadística es relevante también para determinar los métodos y criterios usados para evaluar los esquemas, y el papel más importante que tiene, es el definir cómo debe ser la muestra sobre la que se basa la comprensión del sistema de tráfico en estudio y las razones de por qué se usan muestras son:

- a) Es impráctica o muy costoso (en recursos económicos y de tiempo) hacer un registro de toda la población afectada.
- b) Por la frecuencia y rareza con lo que suceden los eventos es imposible manejar toda la población.
- c) Pruebas específicas eliminan la necesidad de tener a toda la población.

Con la herramienta estadística se determina el tamaño de la muestra y cómo se obtiene el análisis de los datos.

Para medir las muestras en campo, es necesario construir bloques de datos en torno a su recolección y que estos sean grabados y analizados. Se pueden tener varios tipos de datos, cada uno con sus propias características que restringen como se pueden manipular e interpretar. La medición involucra asignar un puntaje o un valor a la observación hecha. Las reglas que definen la asignación del valor también determinan el nivel de medida, y para estos niveles existen cuatro formas de describirlos, que son medidas: nominales, ordinales, de intervalo y frecuencia. El nominal es el nivel más básico ya que no tiene ningún valor asociado a los datos, si no que sólo sirve para clasificar en una categoría.

El nivel ordinal clasifica los datos en algún nivel, mientras que las escalas de intervalo tienen la propiedad de distinguir entre cada categoría y si está definida en términos de unidades de medida. Las escalas de frecuencia poseen las propiedades de los demás niveles, así como definen el cero.

Los datos también podemos clasificarlos basándonos si la observación posee variables discretas o continuas. Las variables continuas son aquellas que no tienen saltos en la secuencia de posibles valores (como la velocidad o el tiempo), siempre existirá un valor y la posibilidad de valor intermedio entre dos valores dados, y definimos la escala de observación como continua. Las variables discretas son variables que poseen rompimiento entre sus valores (como el número de accidentes o vehículos), que siempre son valores enteros.

Estos datos también podemos clasificarlos si las observaciones son cualitativas o cuantitativas. Los datos cuantitativos son datos numéricos como velocidad, tiempo, número de vehículos o kilómetros, mientras que los datos cualitativos expresan una propiedad no numérica del sistema, como lo es: tipo de vehículo, efectividad, nivel de satisfacción, etc.

Los métodos convencionales para el análisis de datos, asumen que existe una consistencia de comportamiento a lo largo del tiempo. Las características del sistema en una vía se supone que se conservará constante a lo largo del día. Sin embargo, no es posible mantener esa suposición, dado que nuestros modelos dependen en el tamaño de la población (la cual cambia con el paso del tiempo) o con la actividad de desarrollo (que también cambia por temporadas, hora del día, día de la semana y/o la estación del año). La carga vehicular del sistema de transporte dentro de la red, refleja como es dependiente del tiempo y las muestras y datos tomados a lo largo del tiempo son dependientes del mismo.

Considerar que los datos son dependientes del tiempo es distinguir si son procesos invariables al cambio continuo, y para entender qué tipo de datos son, se debe extraer sus componentes de cambio involucrados, proporcionando una idealización dentro de nuestro modelo y clasificar como influyen sobre datos. Los procesos estacionarios (aquellos invariantes por el tiempo) brindan la posibilidad de que las observaciones sean repetidas y distinguen el grado de variabilidad en el resto de los datos, que necesariamente no permite una repetición de las observaciones, pues la información recolectada en un punto momento, por obligación, difiere de otra acumulada en otro tiempo. Las series que dependen del tiempo, son analizadas y descompuestas en sus componentes dejando cuatro clasificaciones básicas:

- a) Tendencia. Este cambio se da a largo plazo en la línea de tiempo con un crecimiento constante. Bajo este régimen se encuentra el crecimiento de la población, el tráfico, etc.

- b) Estacional. Este es el resultado de crecimiento o decrecimiento con respecto al año y la actividad humana que se desarrolle. Como lo es el tráfico en carreteras rurales y el tráfico con fines recreativos.
- c) Ciclos. Resulta de actividades que se comportan cíclicamente y dan por consecuencia que haya una influencia directa sobre el tráfico. Estas variaciones cíclicas poseen un patrón que se repite en periodos breves de tiempo, y dentro de estos ciclos pueden existir otros de ellos. Existe como ejemplo: el trabajo diario, tiempo recreativo los fines de semana, variaciones horarias, etc.
- d) Aleatoria. Es el resultado de efectos a corto plazo en el comportamiento por eventos especiales, como el clima, obras en construcción, o eventos comunitarios.

El proceso del análisis de tráfico es para transformar la información existente de la situación actual de nuestro sistema, en información que provea la explicación de la situación, e inferir los fenómenos que la afectan. Los datos que se obtienen son tomados por fuentes existentes o por las investigaciones realizadas de estudios concretos. La transformación de estos datos en información, requerirá de la aplicación de modelos para su escrutinio y entendimiento.

### 1.3 Dispositivos de control

El propósito de los dispositivos de control de tráfico, así como sus principios de uso, son para promover la seguridad y eficiencia en caminos, por medio de ordenar el movimiento de los conductores a los largo de calles y avenidas. Estos elementos proporcionan al conductor, una forma de regulación y advierten o guían una operación segura, uniforme y eficiente del flujo vehicular.

Para que una señalización sea efectiva, tiene que cumplir con los siguientes requisitos:

- Satisfacer una necesidad importante
- Llamar la atención
- Transmitir un mensaje claro
- Imponer respeto a los usuarios
- Estar en el lugar apropiado a fin de dar tiempo para reaccionar

#### 1.3.1 Funcionamiento de los dispositivos de control

El funcionamiento de los dispositivos de control debe ser usado para determinar si ciertos dispositivos deben ser cambiados para volver a operar con las nuevas condiciones de operación. El mantenimiento físico de los dispositivos de control debe asegurarse de que se mantiene la legibilidad, es visible, y funciona correctamente con respecto a otros mecanismos que se encuentran cercanos a este. En caso de que la legibilidad y la visibilidad del mecanismo está establecida como correcta, entonces su operación debe asegurarse tanto de día

como de noche. También debe existir una revisión periódica para determinar si está operando con las condiciones de diseño.

### 1.3.2 Propiedades de los dispositivos de control

Los criterios de diseño, colocación, operación, mantenimiento y uniformidad, deben de tomar en cuenta los requisitos anteriores con el objetivo de lograr la regulación y seguridad que se persigue por medio de la señalización, ya que, el uso correcto de los dispositivos de control, proveen de la información necesaria para que conductores o transeúntes puedan hacer uso de calles, avenidas y banquetas.

Los dispositivos de control deben ser diseñados de tal forma que características como tamaño, forma y color, composición, iluminación o reflexión y contraste, se combinen para producir un significado claro ante el usuario. Aspectos como la legibilidad y tamaño deben combinarse, para permitir un tiempo de respuesta adecuado.

La ubicación de un dispositivo de control debe ser dentro del camino pero también se debe considerar el campo de visión del usuario del camino. Además debe ser posicionado con respecto a la localización, objeto o situación aplicable para que ayude a transmitir un significado correcto. E inclusive, este mensaje debe ser transmitido tanto de día como de noche.

Otra propiedad que los dispositivos de control deben de poseer, es que su operación debe ser constante y uniforme, ya que la intermitencia de uso en estos dispositivos propicia que su propósito de seguridad se deteriore. También los dispositivos de control, de no ser necesarios deben ser removidos, para que no peligre la seguridad de los usuarios.

### 1.3.3 Clasificación de los dispositivos de control

Los dispositivos de control son indicadores de precauciones que se deben tomar en cuenta, limitaciones que gobiernan el tramo en circulación y la información para las condiciones específicas de calles o carreteras.

Los dispositivos se clasifican en:

1. Señales:
  - a. Preventivas
  - b. Restrictivas
  - c. Informativas
2. Marcas:
  - a. Rayas
  - b. Símbolos

- c. Letras
3. Obras y dispositivos diversos
    - a. Cercas
    - b. Defensas
    - c. Indicadores de obstáculos
    - d. Indicadores de alineamiento
    - e. Tachuelas o botones
    - f. Reglas y tubos guía
    - g. Bordos
    - h. Vibradores
    - i. Guardafangos
    - j. Indicadores de curvas
  4. Dispositivos para protección en obra
    - a. Señales preventivas, restrictivas o informativas
    - b. Canalizadores
    - c. Señales manuales
  5. Semáforos
    - a. Vehiculares
    - b. Peatonales
    - c. Especiales

Quando un dispositivo de control como un semáforo es instalado, bajo condiciones que justifican su uso, éste proporciona eficiencia, en contraste una señalización mal diseñada es: inefectiva, ineficiente, y no proporciona seguridad a conductores ni peatones. Por esas razones, es esencial que se lleven a cabo estudios de ingeniería de tráfico para determinar si el uso de un semáforo justifica su uso.

#### 1.3.4 Los semáforos

Quando los volúmenes de tráfico se incrementan fuera de la capacidad de controles menores como las señales restrictivas o preventivas, es necesario instalar un semáforo, pero para instalar uno en una intersección, se debe establecer un criterio mínimo, como lo puede ser la necesidad de cruce, el historial de accidentes, etc.

Muchos conductores y comunidades creen que los semáforos son la solución a los problemas de intersección, si se instala la señalización basándose en creencia, opinión pública o presión política más que en proceso técnico, esta señal causará vehículos parados, retrasos, consumo de combustible, accidentes de tráfico y propiciará la desobediencia a la señalización existente.



Los semáforos son dispositivos eléctricos que tienen como función ordenar y regular el tránsito de los vehículos y peatones en calles y carreteras por medio de luces, operados por una unidad de control.

#### 1.3.4.1 Ventajas y Desventajas

La señalización propiamente localizada y operada puede traer una o más de las siguientes ventajas:

- Proveen un movimiento ordenado al tráfico.
- Cuando existe un buen trazo físico y son usadas medidas de control, la capacidad de la intersección se incrementa.
- Pueden reducir la frecuencia de ciertos tipos de accidentes.
- Bajo condiciones favorables, la coordinación de semáforos provee de movimiento continuo o casi continuo a velocidad constante a una ruta.
- Interrumpen el tráfico pesado de un sentido para permitir el cruce a vehículos o peatones.

En cambio cuando una señalización está mal diseñada, con una mala ubicación, operada incorrectamente o pobremente mantenida, esta puede resultar en las siguientes desventajas:

- Causa excesivos retrasos.
- Propicia la desobediencia de la señalización.
- Transfiere el tráfico a otras rutas para evitar la señalización.
- La frecuencia de accidentes puede incrementarse.

#### 1.3.4.2 Tipos de semáforos

Con base en el mecanismo de operación de los controles de los semáforos estos se clasifican en:

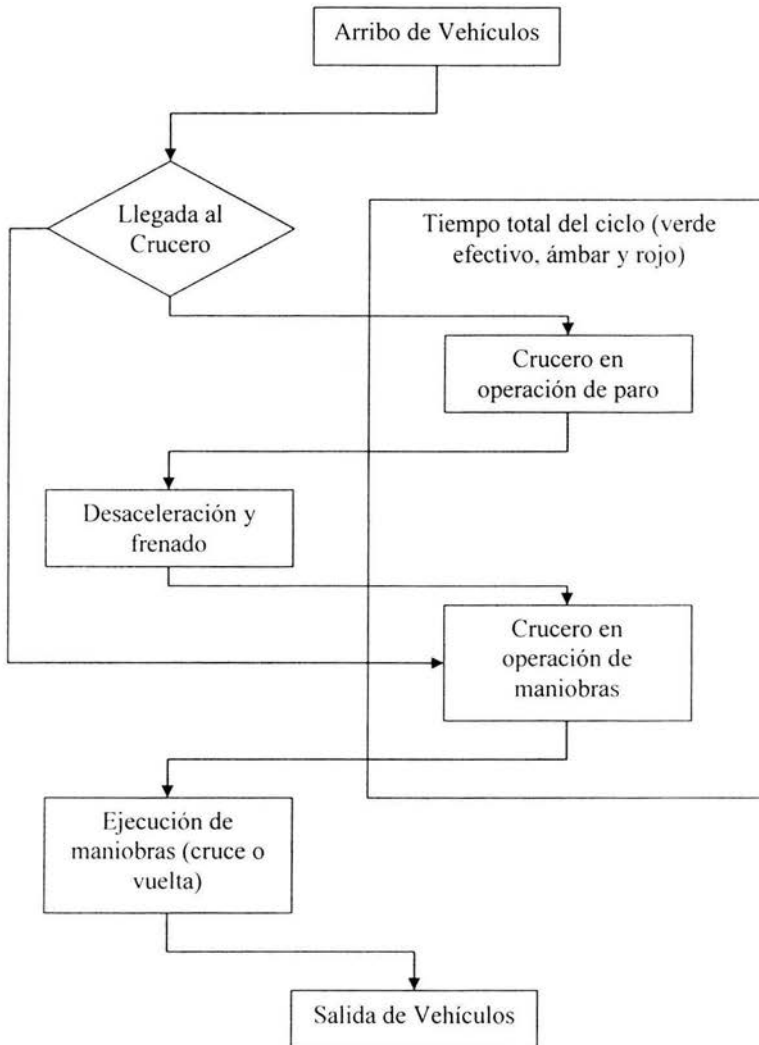
1. Semáforos para el control de vehículos
2. Semáforos para pasos peatonales
3. Semáforos especiales

Los semáforos para control de vehículos pueden estar accionados por el tránsito o ser de tiempo fijo. De ser accionados por el tránsito, puede ser total o parcial su modificación de tiempo se fase. Los semáforos peatonales, operan por que hay un alto volumen peatonal o por cruce de zonas escolares. Finalmente los semáforos especiales, pueden usarse para regular el uso de carriles o paso a puentes, maniobras de vehículos o parte de la alerta para el paso de trenes.

### 1.3.4.3 Operación generalizada de un cruceo

La operación de un cruceo se debe a la facultad que tiene para permitir las maniobras necesarias debido a su geometría con respecto a otro u otros sentidos.

Esquemáticamente se representa así:



#### 1.4 Mantenimiento de la señalización

Un mantenimiento de la señalización debe consistir en un programa que proporcione soluciones al mantenimiento preventivo y correctivo de la señalización en un sistema de control aplicado a una red de tránsito. Si la señalización está en un mal estado, posee un mal desempeño y propicia el riesgo en la seguridad vial. Y en el caso de los semáforos, generan retrasos y hasta accidentes, es por esta razón que el mantenimiento preventivo debe aplicarse a esta señalización.

Para asegurar que los sistemas de señalización están trabajando correctamente y el flujo vehicular es eficiente y seguro, se debe monitorear con regularidad las intersecciones y actualizar las estrategias de control incluyendo los planes de tiempo. Desafortunadamente, la actualización de estas estrategias de control requiere de un trabajo extenso y costoso, como consecuencia, el plan de operación de diseño sigue actuando aún cuando ya está desactualizado. Y cuando la congestión no es soportable o hay fallas en el equipo, es cuando se considera la reevaluación de los planes de tiempo.

El mantenimiento de la señalización puede ser dividido en tres: el mantenimiento preventivo, el mantenimiento reactivo y las modificaciones al diseño.

El mantenimiento preventivo involucra la inspección y ajuste de la señalización a intervalos regulares, con el objetivo de evitar fallas en el sistema con el mantenimiento oportuno. Este tipo de mantenimiento involucra, reemplazo de luces, limpieza de las caras, alineación, monitoreo de los detectores y la inspección y prueba del equipo de control

El segundo tipo de mantenimiento, el reactivo, involucra procedimientos que se deben llevar a cabo cuando la señalización o el control del equipo fallan parcial o totalmente.

El tercer tipo de mantenimiento, el de diseño, involucra el cambio de las señales, los planes de tiempo o el equipo reflejando el cambio de las condiciones en el tráfico. Es en este tipo de mantenimiento donde la revisión de la operación existente se realiza con el objetivo de satisfacer el objetivo de la señalización como un mecanismo de eficiencia para la movilización del flujo vehicular.

## Capítulo 2. La metodología de la simulación

### 2.1 La simulación como herramienta metodológica

Los modelos de simulación constituyen una herramienta metodológica que permite estimar la dispersión del tránsito a lo largo de una red vehicular. En este modelo, se utilizaron las arterias principales de la Delegación Benito Juárez como sitio de interés, ya que es la delegación con más viajes generados de acuerdo con el censo origen - destino realizado en 1994. En este trabajo se analiza la dispersión de los vehículos y cómo estos forman sitios de congestión a lo largo del área de análisis, con base en la simulación se puede detectar cuáles de estos sitios pueden mejorar la agilidad vial aprovechando la capacidad de la vía en estudio.

Un sistema vial funciona aceptablemente cuando la magnitud del flujo, circulando a una velocidad razonable, es menor que la capacidad para alojar el flujo vehicular presente, sin demoras excesivas. Cuando estos valores están muy próximos a la capacidad, el tráfico se torna inestable y comienza a presentarse la congestión. La demanda de tránsito ya sea presente o futura, se considera como un dato conocido, mientras que la capacidad es una tasa de flujo que puede soportar una carretera o calle establecida por el diseño.

La movilidad depende del tráfico vehicular y ahora es parte integral de nuestra sociedad. Desafortunadamente, la capacidad de las redes de caminos y calles han sido excedidas en densidad por el gran crecimiento de las áreas pobladas y las posibilidades de expansión ya son muy limitadas. Para resolver estos problemas se ha investigado a lo largo del congestionamiento qué provoca una vialidad en saturación y el objetivo es ganar un mejor entendimiento del manejo de tráfico y manejo de información relativa a este suceso.

El componente vital en los sistemas de transporte es la predicción de escenarios, y es donde la rama de simulación puede probar ser una herramienta poderosa sobre redes de gran escala. Inclusive, la simulación puede incluir escenarios antes de justificar inversiones a estos sistemas de transporte. Así, estos escenarios se convierten en alternativas si presentan un mínimo de requisitos que justifican una obra de mejora vial, o en caso de obras complementarias, hacer una proyección de cómo estas obras afectarán a la vialidad de interés durante el proceso constructivo.

Con el paso del tiempo, en los últimos años se ha incrementado la capacidad de análisis por medio de la herramienta computacional, haciendo que se realicen estudios cercanos al tiempo real, siendo esto un factor que ayuda a la proyección de escenarios.

El requisito de la simulación para que sea lo más real posible, es que tiene que ajustarse a los datos reales y estos datos deben reflejar la situación real que se

presenta en los puntos de estudio. En este caso de estudio, los datos son de las estaciones de aforo permanente del D.F. y de aforos de campo realizados *in situ*.

## 2.2 El proceso de simulación

En general la simulación se puede definir como una representación dinámica de una parte del mundo real por medio de un modelo que cambia en el tiempo. Estos modelos pueden generarse con base en algoritmos computacionales y ser usados para el análisis de tráfico y transporte, y su propósito es la investigación para la planeación en el área de transporte.

Los componentes que han hecho que exista un desarrollo en esta área son: los avances en la teoría de tráfico, la tecnología en el área de cómputo y las herramientas de programación, el desarrollo de la infraestructura de la información y la demanda para tener mejores medidas y planes sobre las consecuencias que el tráfico genera.

Existen diversas formas de simular con el objetivo de realizar predicciones del área de análisis y de las condiciones de operación del tráfico. En general, el parámetro más importante es el horizonte de proyección; el cual determina en qué periodo de tiempo debemos implantar la solución para que sea efectiva, cumpla con su propósito, y se realice la justificación de la inversión y la construcción de la obra. En segundo lugar se encuentra los datos de entrada, como son las fuentes de donde se tomaron los datos o las fuentes de donde estos provienen.

Datos Actuales      Análisis Estadístico      Simulación      Optimización

FIG 2.1  
Procedimiento esquemático de la simulación

El uso de los simuladores para los datos actuales, sirve para el análisis de desempeño en el corto y largo plazo dentro de la red. Para obtener el pronóstico, la simulación debe representar en el futuro al estado actual y con las herramientas actuales de cálculo, ese problema ha sido superado, entonces estimar las fronteras de demanda dentro de la red simulada es ahora el principal problema, al cual se enfrenta la simulación.

### 2.2.1 Principios de simulación

El punto de arranque para la predicción de tráfico debe ser la información del estado actual de la red, desafortunadamente dentro de muchas áreas urbanas y redes de transporte, estos datos se encuentran dispersos en distintos puntos de la red. Las fuentes de información con las que se cuenta para el análisis de tráfico provienen principalmente de detectores, los cuales proporcionan datos

permanentemente, y toda esta información es local.

El enfoque es proveer información a lo largo de la red vial y relacionar los datos locales con un micro simulador; así la información no cubierta por mediciones puede ser derivada de las regiones donde existe este conteo. El conteo de tráfico local está combinado con la estructura de la red para que refleje flujo dinámico, justificando la idea de la simulación para redes de transporte: el conteo de tráfico local sirve como entrada para la simulación de flujo resultando en información global de la red. La simulación de una red de tráfico es más compleja que la simulación de un corredor o un cruce, así que para poder manejar topologías complejas dentro del flujo de la red, el modelo dentro del software elegido asegura tener las reglas necesarias que reflejan el comportamiento para tráfico multi carril y cambios dentro del mismo.

### 2.2.2 Justificación de la simulación

En todo sistema de transporte la simulación es una aplicación excelente basándose en la investigación y la planeación, porque es un área donde las herramientas analíticas, aún con su importancia, están limitadas a subsistemas o subproblemas, sin existir alguna herramienta a nivel global.

Un elemento importante de cualquier sistema de transporte urbano, son las intersecciones o cruces y para su análisis generalmente se usa la metodología del "Highway Capacity Manual" y en el "Manual de Capacidad Vial" publicado por la SCT; ambos documentos establecen cómo debe efectuarse el análisis de intersecciones con semáforo, sin embargo se esta metodología tiene las siguientes limitaciones:

"No toma en cuenta el impacto potencial de las congestiones después de los cruces. Ni tampoco detecta ni ajusta los impactos por congestión en el flujo vehicular y la operación de las intersecciones"

Como resultado de estas limitantes, se hace necesario buscar algún método práctico y confiable para analizar situaciones que no se contemplan dentro de estos dos manuales.

Otro aspecto importante de la simulación es la posibilidad de hacer ajustes en el sistema real sin tener consecuencias inmediatas ya sean favorables o desfavorables sin descartar el costo por el ajuste de la señalización realizada experimentalmente.

También, es posible tener resultados previos a la aparición de problemas, ya que la simulación que se hace para representar el estado del sistema, permite una fácil modificación a los datos insertados y los factores de crecimiento, logrando ver estados críticos de operación meses o años antes de que estos se presenten y visualizar soluciones con anticipación. En sí, es vigilar su crecimiento futuro.

### 2.2.3 El tráfico como un objeto de simulación

El transporte terrestre es el movimiento típico para las personas y mercancías a lo largo de una red de caminos y calles, y como tal está sujeto a problemas característicos de los mismos. Los sistemas de tráfico se caracterizan por un número de aspectos peculiares difíciles de analizar, controlar y optimizar. También estos sistemas cubren grandes áreas, poseen un gran número de participantes y los objetivos de los participantes pueden llegar a ser distintos de aquellos que operan el sistema, (conflicto de la operación del sistema contra la optimización de uso) y el sistema tiene muchas entradas fuera del control de la operación y de sus participantes (condiciones climatológicas o ambientales, número de usuarios, etc.)

Además, los sistemas de transporte dentro de caminos y calles son dinámicos en cuanto a su naturaleza, esto es, que el número de unidades en el sistema varía de acuerdo con el tiempo y con aleatoriedad. Entonces, un gran número de participantes están presentes al mismo tiempo lo que significa que se tiene un gran número de interacciones de los elementos dentro del sistema con ellos mismos (cambios de carril, operaciones entre ellos, etc.) y con los dispositivos de control (señalización, semáforos, etc.).

Los sistemas de transporte son sistemas de interacción entre hombre - máquina, y significa que las actividades en el sistema incluyen la interacción entre dos elementos de interacción humana (conductores) y de interacción de elementos hombre - máquina (el conductor y el vehículo, la información del tráfico, los sistemas de control, el estado físico del camino, etc.) Las reglas para la interacción dependen de la percepción humana, ya que las observaciones y reacciones dependen de los conductores y no de la tecnología que componen a los sensores o los sistemas de monitoreo.

### 2.3 La simulación de tráfico

Los programas de simulación de tráfico tienen aplicaciones clasificadas en diferentes sentidos. Una clasificación básica distingue una división entre simulación macroscópica y microscópica; también existe la que es continua y discreta en el tiempo. Dependiendo del problema que se pretenda analizar, se puede separar a la simulación microscópica en simulación para intersecciones, secciones del camino y de la red. Esta segregación divide áreas especiales donde se quiere vigilar la seguridad vial, los sistemas de control para obtener información a detalle del tráfico.

Uno de los casos de estudio en donde se dio uso a la simulación, fue la del desplazamiento de pelotones con base en investigación teórica realizada con los modelos de General Motors. En estos modelos una ecuación diferencial gobernaba el movimiento de cada vehículo del pelotón sujeto al análisis. Después, se desarrollaron los modelos para análisis de las intersecciones. Con estos modelos básicos se empezó la teoría del flujo de tráfico y la simulación.

Bajo la orientación práctica de la simulación, el análisis de caminos y calles está relacionado a responder preguntas sobre el flujo del tráfico, cuáles son sus características de operación y su capacidad. Los retrasos y longitud de colas se han convertido en el pivote de estudio para simulación y la investigación en el ámbito internacional.

En el área de control de señales, el primer uso de la simulación con objetivo en un caso práctico fue entorno a la fórmula de Webster, a partir de la cual una fórmula se hacían correcciones basadas en la simulación y estas se añadían a los modelos de retraso que derivan de la teoría de colas. La nueva señalización basada en semáforos que actúa con la carga vehicular, añade un nuevo panorama a la simulación de la señalización, ya que, tradicionalmente se tenía un control fijo de las señales y el tráfico se controlaba reactivamente a la presencia de la señal, ahora sucede lo contrario, las señales reaccionan al tráfico y el análisis del control de las reacciones es tan importante como el análisis del tráfico en sí. El producto de la simulación de tráfico ha encontrado soluciones como usar un control en tiempo real para el análisis operacional.

La mayoría de los problemas de transporte son afines a redes. Dentro de las redes hay que combinar diferentes tipos de intersecciones (con y sin señalización, preferencia de paso, etc.) y diferentes tipos de vínculos entre ellos (ejes, avenidas, calles, arterias primarias o secundarias, etc.) obligando a que la simulación dependa de herramientas que consideren análisis de redes y no sólo tomar programas que resuelvan conflictos en intersecciones o secciones de caminos.

La mayoría de las aplicaciones para simulación están basadas en interacciones entre vehículos y son microscópicas en su naturaleza. El análisis de flujo es un área donde no ha sido descartado el uso de la simulación macroscópica (o de flujo continuo) y sigue en uso.

En cuanto a la seguridad vial, la simulación ha encontrado problemas para modelarla, ya que en los programas de simulación los conductores están programados para evadir colisiones, sin embargo, estos en la realidad existen, algunos autores han tratado de simular situaciones de conflicto por medio de la simulación, pero en general, la simulación de la seguridad vial como herramienta sigue faltando en el análisis de tráfico. La simulación de la seguridad vial pertenece al campo donde se tiene que modelar la percepción y reacción de los conductores, y su campo sería mucho menor dentro de la micro simulación.

La simulación en esta área está buscando solucionar los problemas de movimiento basados en la demanda de viajes. Bajo este enfoque, la solución analítica parte de un modelo agregado de peso hacia un modelo desagregado de elección individual. La simulación de la demanda tiene por objetivo reproducir el patrón de viaje (número de viajes generados, periodo del día, propósito, origen - destino, modalidad de transporte y uso de rutas) de la población asumiendo el comportamiento de conducta de los individuos que la componen.



## 2.4 Macro simulación y micro simulación

Como se ha citado, el tráfico puede ser visto como un sistema complejo para ser modelado. El desarrollo de los macro modelos es una de las aproximaciones primarias para el modelado de sistemas complejos, estos modelos se enfocan en observar el comportamiento del sistema a gran escala y tratan de definir y reconstruir el comportamiento en términos de un conjunto de parámetros abstractos y de sus funciones de probabilidad. En el caso particular del tráfico, los macro modelos son derivados de modelos dinámicos de flujo e involucran parámetros como volumen de tráfico, y velocidad promedio en las vías que componen la red.

La simulación basada en macro modelos tiene la ventaja de que el tiempo de ejecución es relativamente corto y el cálculo está basado en este conjunto de parámetros abstractos. Los modelos macroscópicos son útiles sólo cuando se necesita hacer predicciones sin detalle, y esa condición es suficiente para el proyecto. Los aspectos internos del modelo, por tratarse de un sistema complejo, son no - lineales, como consecuencia son sensibles a la variación de las condiciones iniciales, una alteración en los datos de entrada puede tener un impacto arbitrario y grande en el comportamiento global del sistema. En el proceso de conjuntar y abstraer la información, los macro modelos pierden la sensibilidad y sólo captan el comportamiento del tráfico bajo condiciones ideales.

Otra forma de enfrentarse a los problemas de tráfico buscando tener mejores resultados es por medio de los micro modelos. A diferencia de los macro, estos trabajan visualizando el sistema como un conjunto de componentes de menor escala. El foco principal es identificar los componentes del sistema, descubrir cuál es su comportamiento local y la interacción entre ellos. El sistema global surgirá a partir del comportamiento de los componentes individuales y su interacción entre sí; obteniéndose un comportamiento global más realista y complejo como resultado de la conducta local. En el caso propio del tráfico, la investigación se desarrolla en torno al comportamiento del conductor, el seguimiento y maniobras entre carriles.

Existen dos problemas con la micro simulación: el desempeño computacional y el costo de desarrollo. La micro simulación se desarrolla a un nivel muy detallado dentro del sistema, tratando de imitar el comportamiento de cada entidad dentro del sistema por consecuencia, el consumo de procesamiento de datos es muy alto. Correr una micro simulación dentro de un área metropolitana para una red de tráfico, involucra que se imite el comportamiento de miles de automóviles, semáforos, peatones, etc., resultando en un consumo importante de tiempo computacional.

### 2.4.1 La macro simulación de Synchro

Synchro en su versión 4.0 es un paquete para modelado y optimización de los tiempos de los semáforos. Los métodos que tiene implementados son los que

están registrados en el "Highway Capacity Manual". Es capaz de hacer cálculos de capacidad y optimizar los ciclos y fases de los semáforos de la red, haciendo más fácil la búsqueda del óptimo dentro del diagrama de fases. También es capaz de ayudar a la coordinación, para la reducción de retrasos dentro de la red planteada.

El uso de esta herramienta como la opción para desarrollar el análisis de la red fue seleccionada por contener la normatividad del "Highway Capacity Manual" y de estas normas técnicas se desprenden normas del "Manual de Capacidad Vial" de la SCT, además la metodología contenida dentro del software son modelos de mayor detalle que los usados tradicionalmente en el análisis de capacidad vial, congestión y semáforos. Esta herramienta ofrecerá un análisis preliminar y posteriormente un ajuste a la solución propuesta en cuanto a encontrar el punto de operación óptima de los cruceros en la red tratada.

#### 2.4.2 La micro simulación de SimTraffic

El software de SimTraffic en su versión 4 está diseñado para modelar redes con cruceros con señalización o sin ella. El principal propósito de SimTraffic es para verificar y ajustar la operación de la señalización. Como un micro simulador, SimTraffic está diseñado para analizar situaciones más complejas que el macro simulador no puede incluir, como lo es:

- 1 Intersecciones con poco espaciamiento y problemas de bloqueo.
- 2 Intersecciones con poco espaciamiento y cambios de carril
- 3 El efecto de la señalización cerca de intersecciones sin señalización y caminos de acceso.
- 4 La operación de intersecciones bajo congestión.

El uso de esta herramienta como un micro simulador permite visualizar en una forma de animación y como compilación de información en forma tabular, los datos y resultados generados por el macro simulador. Este software acompaña al macro simulador para poder lograr correcciones y ajustes a la operación de la señalización y visualizar el comportamiento antes de que este suceda.

Para subsanar las limitantes que tanto el "Highway Capacity Manual" y el "Manual de Capacidad Vial" poseen, el micro simulador utiliza modelos estadísticos basados en percentiles y la generación de estados probables de aparición para los escenarios generados aleatoriamente.

#### 2.4.3 Justificación del Uso de Synchro/SimTraffic

Es relativamente extensa la gama que existe de programas diseñados para el manejo y control de tráfico, entre ellos se encuentran los que pueden modelar cruceros independientes ya sea con una señalización o con semaforización, estos pueden competir a ese nivel con Synchro, pero son descartados porque se hará uso de uno que tenga la capacidad para el modelaje de cruceros en red.

Muy pocos programas son los que pueden realizar una macro simulación, para verificar el comportamiento de una red de tráfico. Entre ellos, se encuentra TRANSYT, el cual es la competencia directa de Synchro en cuanto a la macro simulación de redes señalizadas. A continuación se presenta una tabla que justifica la elección del programa Synchro sobre su competencia directa:

	Synchro	TRANSYT
Modelos de semáforos accionados	ò	x
Optimización de Secuencias de Fase	ò	x
Análisis de Capacidad	ò	x
Factor de Ajuste horario	ò	x
Interacción con peatones	ò	x
Modelos de vueltas inglesas	ò	x

Tabla 2.1

Los programas que manejan micro simulación en redes de tránsito también son muy pocos, entre ellos con características similares a SimTraffic, se encuentra CORSIM, la elección sobre este programa se realizó por las siguientes características:

Característica	CORSIM	SimTraffic
Pasos del algoritmo por segundo	1	10
Número máximo de intersecciones máximas	80	300
Número máximo de semáforos accionados	40	300
Número máximo de vehículos	10000	30000
Número máximo de fases para una señal	8	16
Fases coordinadas para semáforos accionados	2 + 6	ilimitado
Máximo número de escenarios para una señal accionada	6	16

Tabla 2.2

Sin embargo, CORSIM cuenta con otro tipo de características con las cuales no cuenta Synchro, como son: manejo de rutas de autobús y paradas de las mismas, estacionamiento sobre la calle, manejo de rampas de acceso y algunos eventos temporales.

Finalmente, la modificación para el diseño de alternativas es mucho más rápida en Synchro que en TRANSYT, permitiendo hacer más útil la micro simulación y más rápida que volver a generar los archivos de procesamiento para CORSIM.

Por estas razones se optó por el uso de Synchro/SimTraffic sobre otros paquetes de software existentes para el análisis de cruceros, corredores y redes viales.

### Capítulo 3. Simulación con Synchro

#### 3.1 Propiedades del Programa y el proceso de optimización con Synchro

Synchro y SimTraffic, son dos módulos diseñados para trabajar en conjunto, las áreas donde se desenvuelven, son las siguientes:

Propiedades del programa de simulación en sus 2 módulos

<b>Synchro</b>	<b>SimTraffic</b>
Macrosimulador	Microsimulador
Dibujo de los enlaces	Operación del sistema vial
Señalamiento de cruceros	Generación de Reportes
Entrada de datos (vph, capacidad, velocidad, longitud de ciclo, etc.)	Número de replicas por escenario
Sincronización	
Opciones de optimización	
Optimización de ciclo	
Diagrama de tiempo - espacio	

Durante la operación de ésta herramienta de cómputo, uno comienza el trazado del crucero, arteria o malla vial a la cual se va a realizar el análisis, de esta forma se determinan las distancias y los cruceros. Para facilitar el trazado de esta malla, el programa tiene la propiedad de agregar un fondo en formato de Autocad que funja como plantilla para guiar el dibujo.

Después, para cada crucero, se asignan sus propiedades de capacidad, velocidad, número de carriles, longitud de ciclo, etc., cubriendo este paso, nuestros datos ya nos proporcionan donde existen los conflictos, ya que en esta etapa se puede visualizar el nivel de servicio al que está operando cada crucero.

Antes de realizar la simulación o la optimización de la señalización, debemos cubrir de que forma queremos que la optimización se realice, ya que se puede particionar la red, introducir preferencias de paso, prioridades de los sentidos de flujo, etc., en si es poner las políticas de operación con las que se realizará la simulación.

Para poder optimizar la red, de debe entender el algoritmo que sigue el software de Synchro cuando realiza el proceso de optimización de la semaforización. El cuadro siguiente expone los pasos de cada función, que se pueden realizar para optimizar los ciclos (total de tiempo asignado a las 3 fases que componen un ciclo) y fases (el tiempo que se requiere para el verde efectivo, el ámbar y el rojo).

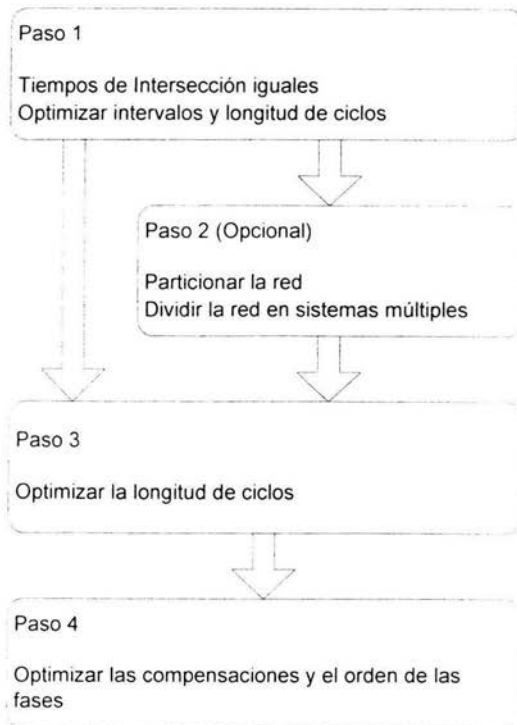


Figura 3.1<sup>5</sup>

- Paso 1: Tiempo de Intersecciones Aisladas. En este paso se considera el volumen, el número de carriles, las fases y sus parámetros. El objetivo de este paso es optimizar los tiempos de los ciclos para la capacidad el cruce y las maniobras a realizar.
- Paso 2: Seccionar la red. Aunque este paso es opcional, el partir la red, divide en zonas, y a cada intersección se añade a una zona y ésta se puede optimizar como una parte separada el sistema.
- Paso 3: Optimizar la longitud de ciclo de la red. Cuando se tiene la red, ya sea con secciones múltiples o no, se determina dentro del sistema la longitud del ciclo, para cada longitud de ciclo se crea un plan de tiempos y el software selecciona el mejor ciclo según su efectividad.
- Paso 4: Optimizar compensaciones y fases anticipadas y retrasos. Una vez determinado el ciclo del sistema (o varios ciclos si se tiene zonificada la red), como último paso de optimizan las compensaciones y en su caso se puede optimizar el orden de las fases.

<sup>5</sup> David Husch y John Albech. *Synchro 4 User Guide*, Trafficware. Albany USA, 2000

### 3.1.1 Optimización de los intervalos de las intersecciones

Internamente Synchro divide el tiempo basándose en cada volumen de tráfico para cada carril que es ajustado por la tasa de saturación de flujo, y maneja el tiempo como tiempo mínimo para intervalo, siempre y cuando este sea posible o un mínimo factible.

#### 3.1.1.1 Optimización por percentiles

Para optimizar los intervalos, Synchro primero trata de proveer un servicio para un tiempo de verde de 90º percentil para el grupo de carriles en flujo. Si no es suficiente tiempo para que el intervalo cumpla con su objetivo, intenta dar un servicio con el 70º percentil y finalmente con el 50º percentil de tráfico. El tiempo extra es otorgado a las fases de la calle principal.

Al tratar de servir con el 90º percentil, Synchro divide los intervalos de tal forma que pueda dar servicio a una cola con el 90% de todos los ciclos. Como los bajos volúmenes de tráfico tienen mayor variabilidad que los altos volúmenes, este método tiende a dar un menor porcentaje de vehículos por ciclo para cada grupo de carriles en flujo.

En la práctica, la optimización por percentiles proporciona a las fases unos segundos extra para procesar vehículos extra. También a las fases más largas se le proporciona tiempo extra, pero este es menor a una proporción del tiempo total. Si el volumen excede a la capacidad, Synchro intenta balancear la razón de vehículos por ciclo, mientras respeta los mínimos estipulados.

#### 3.1.1.2 Reglas adicionales a la optimización

Synchro considera para el caso en que dos o más grupos de carriles se mueven concurrentemente, que el máximo volumen próximo al flujo de saturación es usado para fijar el intervalo de ciclo.

Todas las fases son asignadas siempre y cuando sea mayor o igual al intervalo mínimo. El algoritmo de optimización de intervalos calcula iterativamente para asegurar que los mínimos sean respetados. Si los mínimos exceden la longitud del ciclo, entonces todos los intervalos son reducidos proporcionalmente. Y en el caso de tener peatones, el ciclo mínimo será calculado, como el tiempo de paso, más el verde efectivo, más el tiempo de ámbar y el rojo.

En el caso de existir vueltas inglesas, los procesos descritos se efectuarán cíclicamente. El primer cálculo de las iteraciones en este ciclo, utiliza el factor de vuelta para un tiempo asignado, luego utiliza factores para tiempos permitidos con base en los intervalos, y los recalcula utilizando los factores permitidos, hasta llegar al óptimo.

Si el grupo de carriles es servido por dos o más fases, el volumen es dividido entre el número de fases; sin embargo, el volumen que corresponde al grupo de carriles sólo se usa para solicitar el tiempo para la fase de detección.

Para el caso de contar con un grupo de carriles, en que se tenga una vuelta exclusiva y un carril de vuelta permitida en el mismo conjunto de análisis, los cálculos realizados poseen más iteraciones, el tráfico será asignado entre varios grupos de carriles con base en la tasa de volumen – capacidad. El grupo de carriles asignados afecta las tasas de volumen – saturación; y cambia el óptimo de los intervalos para ser reasignado en una iteración futura.

Finalmente para intersecciones con un bajo volumen vehicular, el tiempo extra que resulta de obtener el tiempo para el 90° percentil, es dividido entre todas las fases de las intersecciones.

### 3.1.2 Optimización de la longitud del ciclo

El ciclo natural, es la longitud mínima aceptable para un ciclo en operación independiente, y para su determinación se recurre a tres posibilidades:

1. La longitud mínima de ciclo, con la cual, se puede hacer la maniobra de cruce bajo el percentil crítico.
2. La longitud de ciclo con el menor Índice de Desempeño (PI) si es posible encontrar un PI, ya que esta opción sólo es tomada en cuenta cuando es posible tener ciclos para intersecciones sobre la capacidad.
3. De no ser posible encontrar el percentil crítico para el tráfico, el ciclo más corto que satisfaga la tasa volumen – capacidad, será usado. Esta opción es un caso especial cuando se manejan vueltas inglesas.

Synchro prueba todas las posibles longitudes de ciclo para las intersecciones, y determina la menor longitud con la que se libra el percentil crítico para cada fase. En algunos casos una longitud de ciclo provee menores retrasos o mejores beneficios en el desempeño. La optimización de la longitud de ciclo trata de determinar el ciclo mínimo de desempeño.

Synchro comienza con una longitud de ciclo corta y optimiza los intervalos para la longitud de ciclo. Si los intervalos para cada fase no son capaces de librar el percentil crítico, Synchro incrementa la longitud de ciclo hasta que el percentil crítico es alcanzado. En la siguiente tabla se presentan los percentiles críticos para la longitud de ciclos:

<b>Longitud de Ciclo</b>	<b>Percentil Crítico</b>
0 – 60	90°
61 – 90	70°
91+	50° ( $v/c < 1$ )



Tabla 3.1<sup>6</sup>

Para ciclos mayores que 90 segundos, la relación volumen – capacidad simplemente tiene que ser menor a 1, ya que esta relación es el tiempo necesario para realizar las maniobras en un cruce. De no encontrar una longitud de ciclo aceptable, el ciclo adoptado es el que tiene menor PI. Usando la relación de volumen – capacidad, se tienen contempladas las pérdidas generadas por las maniobras en el cruce y el conjunto de estas pérdidas es el tiempo total perdido.

Cuando se manejan uno o más movimientos en el límite de la capacidad o superior, el procedimiento de optimización estándar es agregar en cada iteración un ciclo mayor. Las longitudes de ciclo mayores añaden capacidad adicional pero hay menor uso de la proporción del ciclo para el ámbra y para el tiempo total de pérdida.

Si la longitud de ciclo excede los 120 segundos, la cantidad adicional de capacidad empieza a ser menor cada vez, mientras que el retraso incremental tiende a incrementarse. En cierto punto el costo del retraso extra no se contrapone a la capacidad extra aún cuando se haya incrementado la longitud de ciclo.

Durante la optimización de la longitud de ciclo, se escogerá la de menor PI, y la forma de calcularse es:

$$PI = \frac{D*1 + St*10 + QP*100}{3600} \quad (3.1)$$

Donde:

*PI* = Índice de Desempeño.

*D* = Percentil del retraso de la señal (segundos)

*QP* = Penalización de cola. (número de vehículos afectados)

*St* = Vehículos detenidos

El percentil del retraso de la señal, añade 450 segundos de retraso por cada vehículo que no pudo ser servido, esto ocasiona que la longitud de ciclo detenga su incremento. Cuando se añade capacidad para un vehículo se incrementa el retraso de los otros vehículos por 450 segundos. En general, ciclos cortos tendrán un retraso uniforme y serán favorecidos cuando se comparen los retrasos de varios ciclos. El cálculo del retraso favorece ciclos largos en situaciones de congestión. Y para ciclos de longitud menores, además de proporcionar beneficios de operación, las longitudes de cola son menores y las bahías operan más eficientemente.

<sup>6</sup> David Husch y John Albech, *Synchro 4 User Guide*, Trafficware, Albany USA, 2000

### 3.1.3 Optimización de las compensaciones

La optimización de las compensaciones establece que se debe cambiar el plan de tiempo de una intersección, con el fin de que trabaje mejor con la señalización vecina. Con esta opción se prueban los posibles desbalances y las combinaciones de avances-retrasos. Para utilizar esta optimización, se analizan solo los escenarios del 50º y 90º percentil, y el peso para el 50º percentil es duplicado.

Para cada combinación de las compensaciones y los avances-retrasos, Synchro reevalúa los patrones de salida y las intersecciones adyacentes para el cálculo de los retrasos.

Cuando se realiza esta optimización, Synchro recorre el ciclo en intervalos de 16 segundos, asigna un valor para el máximo retraso, y luego calcula las compensaciones cada 4 segundos, después toma otro máximo y lo reduce con intervalos de 1 segundo.

### 3.1.4 Particiones de la red

En ocasiones se divide la red en múltiples subsistemas con sus longitudes de ciclo, permitiendo que los planes de tiempo se ajusten a condiciones locales. Las razones para dividir en múltiples subsistemas son:

- Distancias largas influyen en partes de la red.
- Varias partes de la red poseen diferentes características de tráfico.
- Es posible usar longitudes menores de ciclo en algunas áreas, y proporcionar mayores en áreas más congestionadas.

En contraste, las razones para usar un solo sistema es:

- Ciertos tipos de semáforos no soportan la segmentación de la red.
- Si las intersecciones cubren menos de 150 metros entre cada una de ellas.

Aún cuando todas las intersecciones se encuentren en la misma zona, la optimización de la longitud de los ciclos, recomienda que algunas intersecciones individuales operen independientemente, eso significa que los candidatos para operación independiente pueden ser incluidos en la misma zona.

La división de la red con motivo de la optimización, calcula el Factor de Coordinación (CF) para cada par de intersecciones adyacentes, cualquier intersección superior al valor límite, será puesta en la misma zona. El valor del CF varía de 0 a 100. La elección de un solo sistema es posible, y la modificación de las zonas puede ser alterada basándose en experiencia laboral, del conocimiento de la red, o requisitos de trabajo. Aún cuando existan múltiples

zonas, las intersecciones pueden estar en el mismo sistema, si se asignan a la misma longitud de ciclo.

### 3.2 Los modelos de optimización

Los algoritmos que utiliza Synchro, fueron explicados cualitativamente, ya que siendo un programa de código cerrado, sólo se tiene acceso a esa información por ser derecho de los autores. En cambio, las especificaciones técnicas de los modelos son las técnicas que el "Highway Capacity Manual" posee, además de técnicas de otros autores para cálculos de retrasos. Estos modelos engloban fenómenos generales para la optimización de la señalización con base en el retraso de los vehículos, que es la medida fundamental para la estimación del tiempo de los ciclos y fases de un semáforo.

#### 3.2.1 Factor de Coordinación (CF)

El factor de coordinación (CF) es una medida de conveniencia para coordinar intersecciones. Varios criterios son usados como intentos para determinar si la coordinación es justificable, estos criterios son usados para determinar el CF en una escala de 0 al 100, cualquier calificación de 80 o superior, indica que las intersecciones deben ser optimizadas para evadir problemas de bloqueo, mientras que las calificaciones de 20 o menores indican que las intersecciones están muy separadas para que una coordinación entre ellos sea satisfactoria.

El CF es usado cuando se optimiza una red segmentada, las intersecciones que se encuentren con un valor CF mayor que el límite, son colocadas dentro de una misma zona o sistema de señales; y si las intersecciones están debajo del límite inferior para un valor de CF, es permitido que las intersecciones trabajen sin coordinación.

Los siguientes criterios son usados para determinar el factor de coordinación:

$CF$  = Factor de Coordinación

$CF = \text{Max}(CF1, CF2) + Ap + Av + Ac$

$CF1$  = Factor de coordinación Inicial del Tiempo de Trayecto

$CF2$  = Factor de coordinación Inicial del Volumen por Distancia

$Ap$  = Ajuste del Pelotón

$Av$  = Ajuste del Volumen

$Ac$  = Ajuste de la longitud de ciclo

##### 3.2.1.1 Distancia entre intersecciones

La distancia entre intersecciones es el elemento más importante, ya que afecta al CF en varios sentidos. Para distancias mayores que se cubren en 80 o más segundos, las intersecciones comienzan con un CF de 0 por razones de lejanía, en contraste, aquellas intersecciones con menos de 4 segundos, comienzan con

un CF de 100, estas intersecciones están tan próximas que causan problemas de bloqueo. Las intersecciones que se encuentren comprendidas en este rango de 4 a 80, se les asigna un CF usando la fórmula:

$$CF1 = 100 - (\text{tiempo} - 4) * \frac{100}{76}$$

### 3.2.1.2 Promedio de Tráfico

El Promedio de Tráfico por ciclo cuando excede la distancia entre intersecciones, es otro criterio que al igual que la distancia entre intersecciones, se utiliza para probar si el promedio de tráfico excede la capacidad entre intersecciones (conocida esta distancia como intervalo), entre las intersecciones por longitud de ciclo. Si hay un volumen promedio por ciclo que por dirección excede la capacidad de retención de vehículos, entonces se tiene un problema de bloqueo. Synchro asume que hay un problema de bloqueo, cuando:

$$\text{promediotrafico} > 0.80 * \text{Capacidad}$$

$$\text{Capacidad} = \frac{n * \text{longitud}}{VL}$$

donde:

$n$  = número de carriles

$\text{longitud}$  = distancia entre intersecciones menos 45 metros

$VL$  = longitud promedio del vehículo

Entonces:

$$\text{Volumen por ciclo : } vc = \frac{v * C}{3600}$$

donde:

$v$  = es el volumen por grupo de carriles

$C$  = la longitud de ciclo de la intersección destino

$CF2$  es el factor máximo del grupo de carriles internos y se define como:

$$CF2 = 100 * \frac{\text{promediotrafico}}{\text{Capacidad}}$$

### 3.2.1.3 Pelotones de tráfico

Los pelotones que se forman durante el ciclo del cruce, es un criterio de cuánto tráfico llega entre el 30% y el 60% de la parte del ciclo. Si un vehículo

llega y se separa fuera de un ciclo entero por la llegada del tráfico que proviene de calles adjuntas o entre cuadras, la coordinación entre intersecciones tendrá menos efecto en la reducción de los retrasos, pero si hay una fase corta para el periodo de alto en la intersección consecuente, el tráfico será separado por la mayor parte del ciclo y la coordinación tendrá un efecto menor. El factor de pulso con un valor de 45, indica que los vehículos llegan uniformemente a lo largo del ciclo y que la coordinación no proporcionará ningún beneficio. En cambio un factor de 100, indica que todo el tráfico llega cuando el ciclo está ocupado por un 30% y además favorece la coordinación.

$$\text{Factor de pulso} = \frac{(v_{30} + v_{60})}{(2 * v_c)}$$

donde:

*Factor de pulso* = la proporción de tráfico consecuente en la parte más ocupada del ciclo.

$v_{30}$  = el volumen de tráfico que llega al 30% de ocupación del ciclo.

$v_{60}$  = el volumen de tráfico que llega al 60% de ocupación del ciclo.

$v_c$  = volumen por ciclo

el ajuste para el CF por pelotones se calcula con la formula:

$$A_p = 10 - (100 - \text{factor de pulso}) * \frac{30}{55}$$

#### 3.2.1.4 Volumen de tránsito

El volumen de la calle principal es el criterio que vigila a las calles principales, puesto que si hay un gran volumen sobre una arteria principal, este es más propenso a ser coordinado, que calles con volúmenes menores. El volumen de la arteria, es el volumen horario entre intersecciones incluyendo los movimientos de vuelta. Para obtener el ajuste por volumen se recurre a la siguiente fórmula:

$A_v$  = Ajuste de Volumen

$$A_v = \begin{cases} \frac{(v_2 - 700)}{50} & \text{si } v_2 < 1200 \\ \frac{(v_2 - 200)}{100} & \text{si } v_2 < 2200 \\ 20 & \text{si } v_2 > 2200 \end{cases}$$

donde:

$v_2$  = el volumen total de las intersecciones

### 3.2.1.5 Longitud de Ciclos

El criterio de la longitud de ciclos, busca que el ciclo natural de las intersecciones adyacentes o el grupo de estas, sean compatibles. La longitud del ciclo natural, es la longitud de ciclo que las intersecciones tendrían si operaran en condiciones de independencia y es el ciclo más corto que da un nivel de servicio aceptable. Si dos intersecciones tienden a la misma longitud de ciclo, pueden coordinarse, sin que exista un incremento en el retraso; en cambio, si una intersección necesita de un ciclo largo y otras de uno corto, ambas tendrán que operar con un ciclo largo, lo que provoca un incremento en los retrasos en la intersección con un ciclo natural menor. Esta prueba intenta calcular el incremento en el retraso cuando las intersecciones con un ciclo corto, son incrementadas por un ciclo mayor. La fórmula es:

$$Ac = \text{ajuste de la longitud de ciclo} = \frac{-(\sum \text{Incremento del ciclo})}{2}$$

Donde los valores que puede tomar solamente son:

$$Ac \geq -30$$

$$Ac \leq 0$$

donde:

*Incremento del ciclo* = la cantidad de incremento en el ciclo por coordinación.

Las condiciones para el incremento del ciclo son: si el ciclo más corto puede ser dividido por la mitad, entonces el incremento del ciclo será:

$$\text{Incremento del ciclo} = \frac{\text{Ciclo Mayor}}{2} - \text{Ciclo Menor}$$

Si una o ambas intersecciones operan accionadas por la carga vehicular con una longitud de ciclo flotante, entonces el incremento en el ciclo es la diferencia entre la longitud natural de ciclo mayor y el promedio del ciclo accionado. Si ambos dependen de la carga vehicular, se incrementan ambos.

Este factor de coordinación es evitado cuando incrementa el ciclo significativamente, también evita dar coordinación a semáforos activados por carga vehicular, cuando el ciclo crea desfases.

### 3.2.2 Modelos de Retraso

Para el cálculo de retrasos, Synchro utiliza el Método de Percentiles de Retraso, este método tiene 3 ventajas considerables sobre el modelo tradicional de

Webster usado en el "Manual de Capacidad de Carreteras", y es capaz de modelar las siguientes situaciones con mejor detalle:

- Semáforos coordinados.
- Semáforos accionados por carga vehicular.
- Señalización cerca de la saturación o en estado de saturación.

Los cálculos del Método de Percentiles de Retraso son muy complicados y requieren de iteraciones usando cálculos estadísticos complejos. En cambio la fórmula de Webster, puede realizarse sencillamente, el Método de Percentiles de Retraso está diseñado para realizar los cálculos dentro de una computadora.

Synchro permite la elección del método para calcular los retrasos, si se desea compatibilidad con el "Manual de Capacidad de Carreteras", es mejor usar la fórmula de Webster, y para cuando se necesita un nivel de modelado más detallado en la coordinación, la optimización de las compensaciones, y la evaluación de los parámetros de la señal, es mejor usar el Método de Percentiles de Retraso.

### 3.2.2.1 La Fórmula de Webster

La fórmula de Webster expuesta por el Transportation Research Board, define el retraso como:

$$D = D1 * PF + D2 + D3$$

donde:

$$D1 = 0.5 * C * \frac{[1 - (g/C)]^2}{[1 - (g/C) * \min(X, 1)]}$$

$D1$  = retraso uniforme

$PF$  = Factor de progresión para conteo de la coordinación o tipo de control.

$$D2 = 900 * T * \left[ (X - 1) + \frac{[X - 1]^2 + \frac{8 * k * I * X}{c * T}}{2} \right]$$

$D2$  = retraso incremental

$D3$  = retraso residual de la demanda. Es causado por las colas al inicio del análisis. No es usado por Synchro.

$C$  = Longitud del ciclo en segundos

$T$  = duración del análisis en horas. 0.25 en Synchro

$g$  = Tiempo de verde efectivo

$X$  = Tasa de volumen capacidad ( $v/c$ )

$c$  = Capacidad en vehículos por hora

$k$  = factor de incremento en el retraso, depende de las condiciones de operación. 0.5 para cruces cercanos a al saturación.

$l$  = Factor de filtrado del flujo.

La fórmula de Webster y otros métodos usados por el "Manual de Capacidad de Carreteras" son los estándares para medir el desempeño de las intersecciones, esta fórmula provee de unas reglas uniformes para todos los reportes de diseño y estudios de planeación y este debe ser su campo de aplicación.

### 3.2.2.2 El Método de Percentiles de Retraso

Este método establece que el retraso promedio para un grupo de carriles en un semáforo, está representado por el área del triángulo en la Figura 3.2. El ancho de la base, es igual al tiempo efectivo de rojo correspondiente a su fase. La pendiente izquierda es la tasa de arribo de los vehículos y su unidad es vehículos por segundo. La pendiente del lado derecho del triángulo, es la tasa de servicio o la tasa de flujo saturado, también en vehículos por segundo. La altura del triángulo es la máxima cola que se puede tener, está se mide en vehículos.

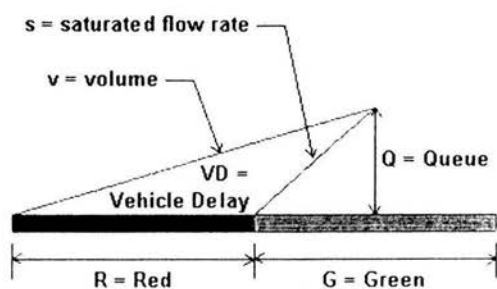


Figura 3.2<sup>7</sup>

<sup>7</sup> David Husch y John Albech, *Synchro 4 User Guide*, Trafficware, Albany USA, 2000



La máxima cola generada, se puede determinar con la siguiente fórmula:

$$Q = \frac{v}{(1 - v s)} * 3600 * R$$

$Q$  = Máximo de cola (no. de vehículos)

$v$  = volumen en vehículos por hora

$s$  = flujo de saturación en vehículos por hora

$R$  = tiempo de fase en rojo

El retraso de vehículos por ciclos, es el área del triángulo y el retraso por vehículo, es el área dividida por los vehículos servidos por ciclo.

$$VD = \frac{v}{(1 - v s)} * 3600 * \frac{R^2}{2}$$

$VD$  = Vehículos en retraso por ciclo (vehículos por segundo)

$$Dp = \frac{VD}{C * v * 3600}$$

$Dp$  = Retraso uniforme por vehículo (segundos)

$C$  = Longitud de ciclo (segundos)

La sustitución nos da:

$$Dp = \frac{0.5}{(1 - v s)} * R * \frac{R}{C}$$

Por definición:

$$X = \frac{v}{s * g * C} ; y \frac{R}{C} = 1 - \frac{G}{C}$$

Resultando en:

$$Dp = 0.5 * C * \frac{[1 - (g/C)]^2}{[1 - X * (g/C)]}$$

Esta fórmula es similar a la de Webster, para definir  $D1$ , sin embargo, la diferencia principal entre los Percentiles y la fórmula de Webster, radica en la

determinación del tiempo del verde y de cómo es el manejo para condiciones cercanas o que superen la condición de saturación.

En el transcurso de una hora o en un periodo de 15 minutos, el tráfico no arriba uniformemente, sino que, algunos ciclos atienden más tráfico que otros, la distribución Poisson puede ser usada para predecir como el tráfico llega a la intersección.

Para contar las variaciones en el tráfico, Synchro modela el flujo del tráfico bajo cinco escenarios de percentiles, el 90° 70° 50° 30° y el 10° percentiles; si se realizan 100 observaciones, el 90° percentil es el 90° ciclo más ocupado durante su atención. Cada uno de estos escenarios representa un 20% de ocurrencia.

Los volúmenes de tráfico para cada escenario, son ajustados de acuerdo con las siguientes formulas:

El número esperado de vehículos ( $\lambda$ ), es el flujo horario dividido por el número de ciclos por hora.

$$\lambda = v * \frac{C}{3600}$$

donde:

$v$  = Volumen en vehículos por hora

$C$  = Longitud del Ciclo en segundos

La desviación estándar del tráfico es la raíz cuadrada del número de vehículos esperados para arribar, bajo una distribución Poisson.

$\rho = \lambda$  = desviación estándar en arribos esperados por ciclo.

El número esperado de vehículos para un percentil dado puede ser calculado usando la distribución Poisson, y la distribución Normal puede ser usada si el número esperado de vehículos es mayor a 6, mostrado en la siguiente fórmula:

$$v^P = (\lambda + z\rho) * \frac{3600}{C} = \text{volumen para el percentil P}$$

donde:

$z$  = es la número de desviaciones estándar necesarias para alcanzar el percentil desde la media, se usa la siguiente tabla para determinarlo.

Percentil	Z
10	-1.28
30	-0.52
50	0
70	0.52
90	1.28

Tabla 3.2

Entonces la fórmula simplificada para determinar los volúmenes ajustados es:

$$vP = v + \left[ z * \frac{v * C}{3600} \right] * \frac{3600}{C} \quad \text{con } vP \geq 0$$

Se tienen ventajas cuando se usan los 5 escenarios, aún cuando las aproximaciones se encuentren por debajo de la capacidad, el 90° percentil puede colocar las aproximaciones sobre la capacidad. Cuando se modela con el 90° percentil, es posible que se modelen mejor las intersecciones, cuando la situación es cercana a la saturación.

El uso de múltiples escenarios, permite que los semáforos accionados por la carga vehicular, puedan ser modelados con diferentes cargas, la operación tan compleja de este tipo de señalización, variará bajo estos 5 escenarios y dará una gama de tiempos efectivos de verde, durante el transcurso de una hora.

Los modelos para esta señalización son:

$$Dl = \frac{VD10 + VD30 + VD50 + VD70 + VD90}{(v10 + v30 + v50 + v70 + v90) * C * 3600}$$

donde:

$Dl$  = promedio de retraso percentil

$VD10$  = 10° percentil de Vehículo-Retraso por hora

$$VD10 = 0.5 * \frac{v10}{(1 - v10/s) * 3600} * \frac{R^2}{C} * 3600$$

y:

$v10$  = 10° percentil de la tasa de volumen en vehículos por hora.

Análogamente, se obtienen los demás.

Si un volumen supera la capacidad para un escenario percentil, entonces la capacidad es usada en vez del volumen para determinar el retraso uniforme. La siguiente fórmula describe el modelo para condiciones de congestión:

$$VD10 = 0.5 * \frac{s}{3600} * R^2$$

Análogamente se determinan los demás.

### 3.2.3 Modelos de sobrecapacidad

Cuando el volumen se acerca a la capacidad, algunos o todos los vehículos no pueden ser servidos por todo el ciclo de la intersección. Tanto el método Percentil como el de Webster, incluyen un término para el retraso incremental D2 para hacer la cuenta del retraso de los vehículos esperando por ciclos extras. El D2 en ambos modelos, son para retrasos por la cercanía a la saturación o en sobre saturación.

El cálculo de D2 es realizado simulado 100 ciclos de tráfico para varias proporciones en sucesión. Asume un periodo de análisis de 15 minutos para que sea compatible con los métodos contenidos en el "Manual de Capacidades de Carreteras", durante la realización del cálculo cada vehículo que se queda sin ser servido, contribuye con 450 segundos de retraso.

Para distancias entre intersecciones cuando están cerca o superior a su capacidad, el retraso consta de dos partes:

$$D = D1 + D2$$

D = retraso percentil total

D1 = retraso uniforme (promedio de los escenarios percentiles)

D2 = retraso de ciclo a ciclo

El retraso de ciclo a ciclo (D2), mide el retraso de los vehículos que no pueden ser servidos por el primer verde y deben esperar al siguiente ciclo. Este retraso, explica los retrasos para arribos no uniformes y para retrasos que el volumen provoca cuando rebasa la capacidad. El valor D2 se obtiene a través de modelar 100 ciclos de tráfico.

Para cada ciclo un escenario percentil es elegido al azar, los escenarios se escogen en proporción inversa a la longitud del ciclo que representan, para una cantidad de tiempo similar.

Durante cada ciclo la cola es ajustada:

$$Qc = Q(c - 1) + (vP - cP) * \frac{CP}{3600}$$

donde:

$Qc$  = longitud de cola al final del ciclo  $c$ .

$vP$  = volumen para el percentil  $P$

$cP$  = capacidad para el percentil  $P$

$CP$  = longitud de ciclo para el percentil  $P$

$P$  = escenario del percentil para el ciclo

El retraso se define como:

$$Dc = Qc * CP$$

$Dc$  = retraso para el ciclo

$$vehc = vP * CP$$

$vehc$  = vehículos por ciclo

y el retraso del ciclo será:

$$D2 = \frac{\sum Dc}{\sum vehc}$$

La cola comienza en 0 para el primer ciclo, después de 15 minutos de simulación, la cola reanuda su conteo con 0 vehículos, con el propósito de no tener valores negativos de  $Qc$ .

Para servicios cercanos a la capacidad,  $v90$  que excedan a  $c90$ , los vehículos para los escenarios del 90° percentil, serán llevados hacia otros escenarios,  $D2$  entonces es una forma de medir las fallas del ciclo desde arribos desiguales.

Para servicios cercanos a la capacidad,  $v90$ ,  $v70$  y  $v50$  que excedan a  $c90$ ,  $v70$  y  $c50$ , los vehículos de estos escenarios percentiles también serán llevados hacia otros escenarios. Después de 15 minutos, cualquier vehículo que no pudo ser atendido por el ciclo, estará en cola  $(v - c) * 0.25$ . El promedio para cada vehículo no atendido, contribuye con un retraso de 450 segundos.

El percentil D2 se calcula de una forma similar al retraso incremental de la fórmula de Webster, si se tiene del modelo de Webster:

$$D2 = 900 * T * \left[ (X - 1) + \sqrt{[X - 1]^2 + \frac{8 * k * I * X}{c * T}} \right]$$

Para cuando hay arribos contables,  $I$  se convierte en 0, y tenemos que el análisis es de 15 min, por lo que la fórmula se convierte en:

$$D2 = 900 * T * \left[ (x - 1) + \sqrt{[X - 1]^2} \right]$$

$$D2 = 900 * T * 2 * (X - 1)$$

$$D2 = 450 * (x - 1)$$

Entonces cada vehículo añade un retraso de 450 segundos con la fórmula de Webster, y el término  $(8 * k * I * X / (c * T))$  estima retrasos de un ciclo a otro debido a arribos no uniformes. Esto es equivalente a estimar variaciones con escenarios percentiles. Ambos métodos producen resultados similares para incrementos en los retrasos, pero el método percentil, modela mejor los retrasos en la semaforización accionada por carga vehicular.

La determinación del volumen de arribo para cada percentil (vP), es ajustado según el contenido vehicular de la siguiente intersección. Los efectos del contenido son:

Tipo de v/c	Calle Arriba v/c	Efecto en D2
< 0.8	Cualquiera	D2 cercano a 0
0.8 a 1.05	< 0.8	D2 no es afectado por el flujo calle arriba
0.8 a 1.05	0.8 a 0.95	D2 es reducido por el conteo calle arriba
0.8 a 1.05	> 0.95	D2 es casi eliminado por el conteo calle arriba
> 1.05	Cualquiera	D2 es afectado por los vehículos no servidos

Tabla 3.3<sup>8</sup>

Si el flujo calle arriba de la intersección tiene un volumen cercano a la capacidad, con un  $v_c > 0.8$ , entonces los valores de vP medidos tienden a estar cercanos al V50, esto reduce el aumento en el incremento del retraso por arribos no uniformes.

Todas las mediciones V50, V70 y V90 son conservadas siempre que sean iguales o mayores a un V50 no medido, si el volumen percentil medido es menor

<sup>8</sup> David Husch y John Albech, *Synchro 4 User Guide*, Trafficware, Albany USA, 2000

que el percentil sin medir, la diferencia es dividida y repartida entre los percentiles anteriores medidos.

Las mediciones de la siguiente intersección no son realizadas si la longitud de ciclo es incompatible o se la intersección es accionada con diferentes controles. Las mediciones de calle arriba tampoco son realizadas con controles de paro para intersecciones sin señalización, pero es realizada para señales si el tráfico fluye libremente para una intersección sin señalizar. Las mediciones calle arriba son usadas para el calculo del retraso incremental y solo para el 95° tamaño de cola solamente, y no se usa para los perfiles de arribo ni para el retraso uniforme.

### 3.2.4 Algoritmo de cálculo de los retrasos percentiles

En cuanto a resultados modelando el tráfico, el método de retrasos percentiles y el método de Webster, en la mayoría de los casos de comparación son muy similares y varían solo un poco de segundos entre ellos. El "Manual de Capacidad de Carreteras" hace la modificación para el cálculo de retraso para señalización activada por carga vehicular y para movimientos en congestión, por lo tanto estos dos métodos son similares. En resumen se presenta:

	Percentil	Webster
Modela Operación	Si	Si
Modela Exclusiones	Si	Aproximado
Modela Transeúntes	Si	Aproximado
Modela Varianza en el tráfico	Si	Si
Modela Congestión	Si	Si
Modela Coordinación	Si	Aproximado

Tabla 3.4<sup>9</sup>

El algoritmo interno realiza los siguientes pasos:

1. Calcula los Volúmenes para el grupo de carriles. En caso de volumen para carriles compartidos, estos se asignan dinámicamente.
2. Calcula la Tasa de Flujo Saturado para el grupo de carriles, la tasa de flujo será el factor de relación usado por el "Manual de Capacidad de Carreteras", donde se incluye ancho, pendiente, tipo de área, factores de vuelta, autobuses y estacionamiento.
3. Estima los patrones de arribo desde las intersecciones coordinadas calle arriba.
4. Encuentra las tasas de flujo para 10°, 30°, 50°, 70° y 90° percentil. Aplica la tasa de flujo a los patrones de arribo de ser aplicable.
5. Para la señalización, accionada, semi-accionada y coordinada-accionada, determina el comportamiento para ausencias y saltos. También encuentra el tiempo de verde para cada escenario.

<sup>9</sup> Idem.

6. Determina las salidas usando los arribos y los tiempos de verdes. Usa las salidas para los arribos coordinados de las intersecciones adyacentes. Regresa al paso 4to. cuantas veces sea necesario.
7. Calcula el retraso para cada escenario usando el tiempo de verde y ajusta el escenario según los patrones de arribo.
8. Toma el peso promedio de los retrasos para cada escenario.
9. Si hay volúmenes cerca o excediendo la capacidad, añade el retraso de ciclo-a-ciclo como retraso residual.

### 3.2.5 Cálculo de los altos

La señalización de algo, se calcula similarmente como los retrasos. Considerando la Figura 3.1, el número total de vehículos retrasados es igual al número de vehículos en cola o Q, en la figura. Sin embargo, los vehículos con un retraso menor a 10 segundos no hacen un paro completo. Synchro calcula, el número de vehículos que realizan un alto total, contando el número de vehículos retrasados para cada tiempo de retraso y ajustando los vehículos mediante la siguiente tabla:

Vehículo(s) Retrasado(s)	Porcentaje en alto
0	0%
1	20%
2	58%
3	67%
4	77%
5	84%
6	91%
7	94%
8	97%
9	99%

Tabla 3.5<sup>10</sup>

Estos altos son calculados para cada escenario percentil y promediado para las fallas de ciclo y la sobrecapacidad de vehículos. El cálculo de los altos se modela a través de 100 ciclos y sirve para la congestión.

### 3.2.6 Cálculo de la Longitud de Cola y Penalización de la Cola

#### 3.2.6.1 Longitud de Cola

Los reportes de longitud de cola muestran la cola generada por el 50º y el 90º percentil. Esta cola representa la máxima distancia cubierta por los vehículos en alto durante un ciclo.

<sup>10</sup> David Husch y John Albech, *Synchro 4 User Guide*, Trafficware, Albany USA, 2000



Considerando la Figura 3.2, se toma como tiempo efectivo de rojo (R), a la base del triángulo, la pendiente izquierda es la tasa de arribo en vehículos por hora (v), en un sistema coordinado, la tasa de arribo puede variar a lo largo del ciclo; la pendiente derecha representa el flujo de saturación en vehículos por hora (s).

La altura del triángulo, es la máxima longitud de cola (Q) en unidades de vehículos. Los vehículos retrasados por un corto tiempo solo frenarán pero no se detendrán, por esta razón, Synchro considera vehículos retrasados por menos de 6 segundos para que formen parte de la cola que se genera. La longitud de cola es en realidad la altura en el punto donde el triángulo tiene un ancho de 6 segundos.

El valor de Q2 es el número de vehículos que llegan a la intersección durante la fase de rojo, después de que el semáforo cambia su fase a verde, vehículos adicionales pueden entrar a la parte posterior de la cola mientras que la parte frontal de esta se disipa.

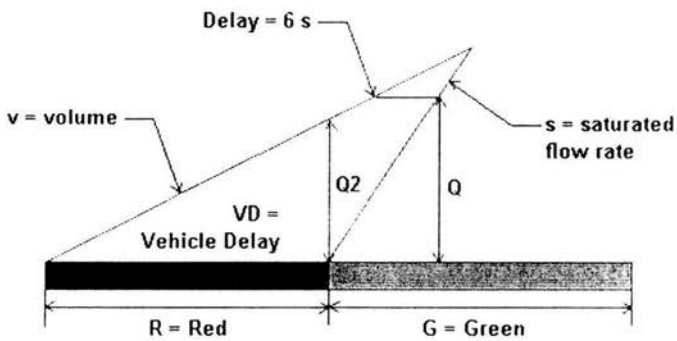


Figura 3.3<sup>11</sup>

El tamaño de la cola según la Figura 3.3 es:

$$Q = \frac{v}{3600} * (R - 6) * \left[ 1 + \frac{1}{s} * \frac{1}{v} - 1 \right] * L$$

donde:

Q = Longitud de la cola en pies

R = Tiempo de rojo

s = Tasa de flujo de saturación en vehículos por hora

<sup>11</sup> David Husch y John Albech, *Synchro 4 User Guide*, Trafficware, Albany USA, 2000

$v$  = Tasa de arribo en vehículos por hora

$L$  = Longitud de vehículos (incluye el espacio entre ellos) en pies

$n$  = Número de carriles

$Fu$  = Factor de Utilización del carril

Si el la tasa de volumen-capacidad ( $v/c$ ) excede el 1, la longitud de cola teórica es infinita. Synchro calcula la longitud de cola como la cola máxima después de 2 ciclos, y eso es igual a:

$$Q' = (v * (C - 6)) + \left( v - s * \frac{g}{C} \right) * \frac{C}{3600}$$

$C$  = Longitud del Ciclo en segundos

$g$  = Tiempo de verde efectivo

Siendo ésta la longitud de cola para las intersecciones saturadas.

La cola del 95° percentil, es calculada al incrementar la tasa de arribo, para contabilizar las fluctuaciones en el tráfico, el volumen no es ajustado por el Factor de hora pico, por que el 95° es el volumen ajustado para la fluctuación.

$$v_{95} = v * PHF_x * \left[ 1 + 1.64 * \frac{vc}{vc} \right]$$

donde:

$v_{95}$  = Tasa de arribo para el 95° percentil

$$vc = v * \frac{C}{3600}$$

$vc$  = Vehículos por ciclo

$$PHF_x = \min(PHF, 0.9)$$

$PHF_x$  = Factor de hora pico

En muchos casos, la cola del 95° percentil no se habrán experimentado por las mediciones de calle arriba, si las intersecciones calle arriba operan cerca o en su

capacidad, entonces se debe usar la cola del 50° percentil, representa la máxima cola experimentada.

Similarmente, si la intersección calle arriba tiene una tasa  $v/c$  mayor a 0.8; la máxima cola es aproximadamente igual a la cola del 50° percentil dividida por el porcentaje  $v/c$ .

El volumen de arribo para la cola del 95° pero no para la cola del 50° es ajustada para tomar en consideración la intersección calle arriba. Si la intersección calle arriba tiene una tasa  $v/c = 1$ , entonces la cola del 95° será igual al 50°. Si la intersección calle arriba tiene un  $v/c = 0.95$ , entonces el volumen para la cola del 95° será limitada al 105% del 50° percentil y la diferencia será del 5%. Estos casos consideran que no hay fuentes de tráfico generadas a la mitad de la cuadra.

Las mediciones calle arriba son usadas para determinar la tasa de arribo solamente. El perfil de arribo es calculado sin estas mediciones y puede tender hacia los movimientos medidos. Y las mediciones no son usadas en el cálculo de perfiles de arribo ni en los cálculos de retraso.

### 3.2.6.2 Penalización de la cola

La penalización de la cola, es una forma de cuantificar la influencia de la cola y los problemas de bloqueo. Esto es equivalente al número de vehículos afectados por el bloqueo. En muchos casos, un ciclo corto experimenta colas cortas y menos bloqueo. La penalización es una forma conveniente para medir el bloqueo dentro de la red. Con esto se forman colas más cortas con ciclos menores para reducir los problemas de bloqueo.

La penalización es calculada tomando el volumen del movimiento bloqueado por el aumento del tiempo de bloqueo. La penalización es calculada tanto para el almacenamiento como el bloqueo calle arriba.

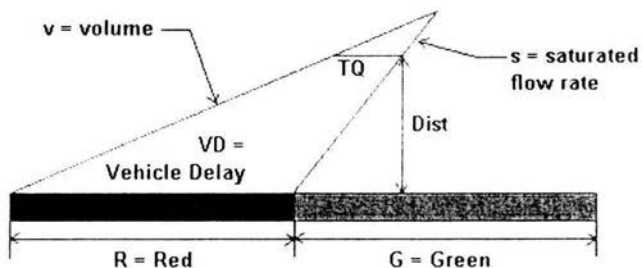


Figura 3.4<sup>12</sup>

<sup>12</sup> David Husch y John Albech, *Synchro 4 User Guide*, Trafficware, Albany USA, 2000

El cálculo de la penalización se realiza con la siguiente formula:

$$QP = \frac{(BT50 + BT95)}{2} * VB$$

donde:

$QP$  = Penalización de la cola

$BT50$  = Porciento de tiempo que es bloqueado el 50° percentil

$BT95$  = Porciento de tiempo que es bloqueado el 95° percentil

$VB$  = Volumen del movimiento bloqueado

$Dist$  = Longitud de la bahía o espacio para la conexión

$$BT = \frac{TQ}{C}$$

$BT$  = Porciento o tiempo que la calle arriba está bloqueada

$TQ$  = Tiempo limite que la conexión es bloqueada en segundos

$C$  = Longitud de ciclo en segundos

La capacidad de almacenaje,  $VB$  será el volumen del carril adyacente, si hay 2 o más carriles que realizan el cruce, solo una parte del tráfico que realiza la maniobra de cruce se incluyen en el  $VB$ . Si el tráfico que cruza entra a una bahía, entonces  $VB$  será el tráfico que realiza la maniobra de vuelta. Para el bloqueo calle arriba,  $VB$  será el volumen en cola para el grupo de carriles.

### 3.3 Consideraciones y Modelos de SimTraffic

SimTraffic es un micro simulador diseñado para modelar redes con intersecciones señalizadas y sin señalización. El propósito es hacer una revisión y verificar el comportamiento de las operaciones con señalización. SimTraffic es especialmente usado en situaciones donde la macro simulación no le es fácil modelar, como son:

- Problemas de bloqueo en intersecciones con poco espaciamiento.
- Problemas de cambio de carril en intersecciones con poco espaciamiento.
- El efecto de la señalización en intersecciones sin señalización y caminos de acceso.
- La operación de intersecciones bajo congestión.

Las entidades que puede modelar en el sistema son:

- Semáforos de tiempo fijo
- Semáforos accionados por el tránsito
- Altos en intersecciones de dos sentidos
- Altos en intersecciones de varios sentidos
- Autopistas Urbanas
- Codos
- Glorietas
- Incorporaciones y desincorporaciones
- Automóviles, Camiones y Autobuses
- Peatones

Los resultados que se pueden obtener de los modelos de SimTraffic en forma de reporte son:

- Retraso por frenado
- Retraso por paradas
- Número de altos
- Longitud de las colas
- Velocidad
- Tiempo de viaje y distancia
- Consumo de combustible y eficiencia
- Emisiones de contaminantes
- Tiempo de verde en semáforos accionados

### 3.3.1 Modelos de SimTraffic

#### 3.3.1.1 Generación de Tráfico y Asignación de rutas

La generación de viajes y la asignación de rutas están basadas en volúmenes de tráfico, estos volúmenes son ajustados por los factores de crecimiento o los ajustes de percentiles, los volúmenes también pueden cambiar entre intervalos. Cuando la simulación usa una semilla para el intervalo de tiempo seguido por el registro de este intervalo de tiempo simulado, para ser usado con el método de percentiles. El propósito de proporcionar la semilla es llenar la red con tráfico. Y el intervalo de tiempo debe ser lo suficientemente grande para que un vehículo cruce la red incluyendo el tiempo de paradas generado por la señalización.

Los volúmenes de tráfico son simulados con base en los volúmenes que son alimentados por los diagramas de Synchro. Estos volúmenes se ajustan por varios factores, uno de ellos es el factor de crecimiento para la hora pico, este factor divide a la hora en periodos de 15 minutos, debido que es común modelar el tránsito con 15 minutos de tráfico pico seguido por un intervalo de tráfico menor.

### 3.3.1.1.1 Generación de viajes

La generación de viajes son añadidos a las entradas de enlaces entre intersecciones, también puede ser añadido entre los enlaces si es especificado. Si ambos puntos de generación existen entonces se genera el máximo entre dos.

Para cada 0.1 de segundo un vehículo es creado cuando  $R36000 < vl$

Donde:

$vl$  = es el volumen horario de tráfico en el enlace o a la mitad de este.

$R36000$  = un número aleatorio entre 0 y 35999

Para un periodo de tiempo dado, se generan más o menos vehículos que el promedio horario, en los periodos de tiempos observados, los vehículos se comportarán con una distribución Poisson de arribo.

Los volúmenes de los enlaces para automóviles y para camiones son calculados independientemente, cada volumen de vehículos pesados es igual al volumen ajustado al porcentaje de vehículos pesado, y el volumen de vehículos es la diferencia del volumen ajustado. Los vehículos pesados que entran al sistema son asignados a un autobús o camión basándose en la composición de flota para vehículos pesados. De igual manera, los carros que entran al sistema son asignados al tipo de vehículos según la composición de la flota.

### 3.3.1.1.2 Generación de Rutas

Cuando un vehículo es asignado a realizar una maniobra de vuelta en la intersección, las vueltas son asignadas al azar basándose en turnos para cada dirección. Se utiliza las siguientes consideraciones:

$vT$  = suma del tráfico en la intersección

$Rv$  = número aleatorio de vehículos entre 0 y  $vT - 1$

Si  $Rv < vlzq$  entonces el vehículo da vuelta a la izquierda, en otro caso;

Si  $Rv < vlzq + vFrente$  entonces el vehículo continúa de frente, y para el resto de los casos: el vehículo gira a la derecha.

Un algoritmo similar se usa para el tráfico generado a la mitad del enlace, el volumen decreciente es:

$$vDecreciente = vCA - vT + vME$$

donde:

$vCA$  = volumen calle arriba en la intersección

$v_{ME}$  = volumen a la mitad del enlace, especificado o proveniente del balance.

Todo vehículo en el sistema sabe cuales serán sus siguientes 3 maniobras, y cuando este cruza una intersección se genera su tercera maniobra.

También las maniobras de los vehículos pesados, se calculan independientemente de los automóviles, e estas son ajustadas dependiendo del porcentaje de vehículos pesados, y el resto de las maniobras son asignadas a los automóviles.

### 3.3.1.2 Seguimiento y Selección de Velocidad

La velocidad de las entidades se modifica según los eventos que se presenten, las cuales representan un cambio, entre otros se encuentran:

- Limite de Velocidad excedido
- Vuelta en el siguiente tramo
- Un vehículo presente frente a otro
- Inicio de la maniobra de cambio de carril
- Incorporación a un carril
- Reducción o ampliación
- Semáforo en fase de ámbar o rojo
- Señal de "alto" o "ceder paso"
- Cruce de peatones en una intersección
- No se puede completar la maniobra de cruce en una intersección
- El siguiente tramo contiene alguna restricción anterior

Los cambios de velocidad suceden de 3 tipos:

1. Velocidad de crucero. Cuando un vehículo no tiene impedimentos para realizar su viaje. La velocidad crucero es igual a la velocidad del intervalo multiplicada por el factor de velocidad del conductor, la cual varía de 0.75 a 1.29.
2. Índice de aceleración. Cada vehículo tiene un índice de aceleración máxima, los vehículos tienen la aceleración máxima cuando su velocidad es de 0 y tienen aceleración 0 cuando poseen su máxima velocidad. La aceleración máxima es de  $3.05 \text{ m/s}^2$  para una velocidad de 0, y la aceleración disminuye linealmente hasta que se alcanza una velocidad de 120 km/h donde la aceleración es 0.
3. Índice de desaceleración. Dependiendo de la situación involucrada, el índice en la desaceleración cambia; la máxima desaceleración posible es de  $3.6 \text{ m/s}^2$  y solo es usada para situaciones de emergencia. Cuando el semáforo cambia su fase a ámbar, los conductores deciden que tipo de desaceleración desean realizar la maniobra de alto, los índices varían de  $3.6 \text{ m/s}^2$  a  $2.1 \text{ m/s}^2$ . Para realizar una maniobra de vuelta, los vehículos desaceleran a una

velocidad de 1.2 m/s<sup>2</sup>. Los tipos de desaceleración se condensan en la siguiente tabla:

<b>Tipo</b>	<b>Desaceleración</b>
decelNORMAL	1.2 m/s <sup>2</sup>
decelPLUS	1.8 m/s <sup>2</sup>
decelHARD	2.4 m/s <sup>2</sup>
decelMAX	3.6 m/s <sup>2</sup>
decelMIN	0.6 m/s <sup>2</sup>

Tabla 3.6<sup>13</sup>

El seguimiento de los automóviles se da en dos tipos, cuando el seguimiento es rápido o cuando el seguimiento es lento. La distancia entre vehículos (o punto de alto) es:

$$DBv = Xu - Lu - DB - Xv$$

donde:

$Xu$  = Posición del vehículo líder (o punto de alto)

$Xv$  = Posición del vehículo de estudio

$Lu$  = Longitud del vehículo líder (es 0 para un punto de alto)

$DB$  = Distancia entre vehículos fija en 0.9 metros

Los vehículos en alto no comienzan movimiento, hasta que el vehículo líder se ha movido por lo menos 1.5 metros. Esto tiene el efecto de crear un tiempo de reacción de un segundo por vehículo.

El seguimiento rápido es un modelo que intenta seguir el movimiento del carro líder y el siguiente, con una brecha de un segundo; este tipo de seguimiento es usado, cuando el vehículo líder viaja con una velocidad mayor que los 0.6 m/s, las fórmulas siguientes son usadas para el seguimiento rápido:

$spdU$  = Velocidad del vehículo líder

$spdV$  = Velocidad del vehículo en seguimiento

$DB$  = Distancia entre vehículos

$HW$  = Avance deseado, depende de los parámetros de conductor.

<sup>13</sup> David Husch y John Albech, *Synchro 4 User Guide*, Trafficware, Albany USA, 2000



$$DSafe = DB + \frac{(spdU^2 - spdV^2)}{2} * decelNORMAL - spdV * HW$$

$Dsafe$  = Limite de distancia de seguridad usar la fórmula inferior si es negativa.

$$Dsafe = DB - spdV * HW$$

$Dsafe$  = Limite de distancia de seguridad usar la fórmula superior si es negativa.

$$SF = Dsafe * \frac{1000}{spdV}$$

En caso de que  $SF \geq -600$  entonces:

$$dV = decelHARD * \left( \frac{1}{2} + \frac{SF}{500} \right) \text{ en otro caso:}$$

$$dV = \frac{decelHARD}{2} + SF * decelHARD * \frac{1.33}{100}$$

donde:

$dV$  = es la desaceleración recomendada

La aceleración debe ser mayor o igual a decelMAX y menos o igual que la capacidad de desaceleración del vehículo.

El seguimiento lento utiliza los siguientes métodos:

$DB2 = DB - 2 * \frac{spdU}{10} - 1$ ; es la nueva distancia después de 0.1 segundo y con el factor de fallo.

$dV2 = \frac{\left( spdV + 2 * \frac{accelMIN}{10} \right)^2}{(2 * DB2)}$ ; es la desaceleración necesaria después de acelerar a 2 veces la accelMIN

$dV4 = \frac{\left( spdV + 4 * \frac{accelMIN}{10} \right)^2}{(2 * DB2)}$ ; es la desaceleración necesaria después de acelerar a 4 veces la accelMIN

$$dv6 = \frac{\left( spdV + 6 * \frac{accelMIN}{10} \right)^2}{(2 * DB2)}$$
 ; es la desaceleración necesaria después de acelerar a 6 veces la accelMIN

Si dv2, dv4 o dv6 son menores que decelNORMAL, entonces el vehiculos acelerará por 2, 4 o 6 veces accelMIN sujeta a la máxima aceleración del vehículo.

Si dv2 es menor que decelNORMAL entonces:

$$dV = \frac{-spdV^2}{(2 * DB2)}$$
 y en caso que  $DB2 < 0$ , entonces:

$$dV = -decelMAX$$

La aceleración debe ser mayor o igual que el negativo de decelMAX y menor o igual que la máxima capacidad de aceleración del vehículo.

### 3.3.1.3 Cambios de carril

Existen varios niveles de tipo de cambios de carril dentro del SimTraffic, y estos se dividen dependiendo de las maniobras que se deben realizar o por el comportamiento del conductor. Estas son:

1. Cambio obligado de carril. Es cuando un vehículo debe realizar una maniobra de vuelta, también es cuando un vehículo en el carril no tiene el suficiente espacio para incorporarse al flujo vehicular, ocasionando que el vehículo pare en la posición en la que se encuentra para iniciar el cambio de carril.
2. Cambio de carril posicional. Este movimiento de carril es un movimiento anticipado para futuras maniobras de movimiento. El posicionamiento mueve al vehículo a un carril para una vuelta futura. Los vehículos no van a realizar esta maniobra si existe la ventaja en quedarse en el carril que se encuentran.
3. Cambio opcional de carril. Este movimiento es cuando el vehículo en el sistema, no necesita hacer ni un cambio posicional y un cambio mandatarario, sino que un carril adyacente posee menos vehículos calle arriba y el carril adyacente proporciona el destino al cual se dirige el vehículo. Si el carril adyacente tiene una menor velocidad el cambio no se realiza. Los vehículos realizarán el cambio de carril siempre te tengan un ventaja al hacerlo.

Para determinar el carril que es necesario, para realizar las maniobras de cambio de carril ya sea por posición o por obligación, un vehículo debe considerar su carril y los dos carriles adyacentes. El carril con una posición lógica, determina cual de los carriles son permitidos calle abajo, para determinar

los carriles permitidos y los carriles deseados. Los carriles permitidos asumen que pueden realizarse cambios, dependiendo de la mínima distancia para cambio y el espacio del enlace. Los carriles deseados asumen que no hay cambios, a excepción de que haya espacio en las intersecciones. Los carriles deseados se usan para los cambios posicionales y los carriles permitidos para los cambios obligatorios.

El carril deseado es determinado por la ventaja de la distancia y se calcula de la siguiente forma:

$$Ventaja = nC * \left( \frac{spdC \min}{spdLimite} \right) - nT * \left( \frac{spdT \min}{spdLimite} \right)$$

donde:

$nC$  = número de vehículos en el mismo carril más adelante

$nT$  = número de vehículos en el carril de cambio más adelante

$spdC \min$  = el vehículo de menor velocidad en el carril actual

$spdT \min$  = el vehículo de menor velocidad en el carril de cambio

$spdLimite$  = el límite de velocidad en el enlace entre intersecciones

Los vehículos son contados como si su posición fuera a 5 segundos de  $spdLimite$ . Si uno o más vehículos están detenidos, los vehículos al frente cuentan como 6 puntos para el  $nC$  y si solo están en desaceleración cuentan menos puntos.

#### 3.3.1.4 Operación de semáforos con tiempo fijo

La operación de los semáforos, ya sea con tiempo fijo o accionado opera secuencialmente.

Los vehículos son aprobados tanto para semáforos de tiempo fijo como los accionados, la intersección señalizada debe de aprobar el cruce para cada uno de los vehículos en cada carril, tanto los vehículos como los peatones son verificados en el siguiente orden:

1. Las vueltas a la izquierda inician su movimiento al inicio del rojo
2. Se mueven los peatones en su fase
3. Los vehículos con fase verde realizan el movimiento de cruce y vuelta a la derecha.
4. Los vehículos con vuelta fase exclusiva realizan su maniobra de vuelta

5. Vehículos que pueden realizar vueltas durante la fase de rojo, si está permitido

Cuando la fase cambia a color verde los vehículos no avanzan hasta que reaccionan dependiendo del tiempo de reacción estipulado en la configuración de la reacción del conductor, y cuando la fase cambia a ámbar, los vehículos que se aprueban son aquellos que pueden realizar el alto, según los algoritmos de desaceleración y también dependen del conductor y el hábito de frenado.

## Capítulo 4. Caso de Estudio

### 4.1 Características de la Delegación Benito Juárez

#### 4.1.1 Geografía de la Delegación

Geográficamente, la Delegación Benito Juárez es el centro de la Ciudad de México. Con una superficie territorial de 26.63 Kilómetros cuadrados ( 2,663 hectáreas), colinda al norte con las delegaciones políticas de Miguel Hidalgo y Cuauhtemoc, cuyos límites se expresan físicamente por el Viaducto Miguel Alemán o Río de la Piedad; al sur, con Coyoacán mediante el Circuito Interior Río Churubusco; al oriente, con las delegaciones Iztacalco e Iztapalapa, cuyo límite es marcado por la Av. Presidente Plutarco Elías Calles; y al poniente, con Álvaro Obregón, limitada por el Bulevar Presidente Adolfo López Mateos.

En su territorio se constituyen 56 colonias y 3 centros urbanos (unidades habitacionales) totalmente dotados de los servicios e infraestructura urbana, a lo largo y ancho de 2 mil 210 manzanas, en las que confluyen las vialidades más importantes de la capital. Cotidianamente, su población convive con más de 1.5 millones de visitantes, trabajadores y prestadores de servicios establecidos en la demarcación, considerados como población flotante, haciendo uso de la infraestructura y mobiliario urbano de la zona, beneficiándose indirectamente de los servicios de mayor demanda en la delegación: agua potable, recolección de basura, vigilancia y seguridad pública, luminarias, establecimientos, mantenimiento y conservación de áreas verdes, bacheo y asfalto de vialidades, entre otros muchos.

#### 4.1.2 Economía de la zona

Económicamente, la Delegación Benito Juárez resulta estratégica en el desarrollo del Distrito Federal, dado que cuenta con una fuente potencial económica, fincada en el sector financiero, el comercio y las exportaciones.

En la demarcación existen 22 mil 398 unidades económicas: conformadas por 11 mil 248 establecimientos de servicios, 9 mil comercios y 2 mil 81 empresas manufactureras, que en su conjunto emplean a más de 190 mil personas.

En el sector exportador, la comunidad alberga a más de 113 empresas exportadoras, la mayoría de ellas dedicadas a las manufacturas de alimentos, papel, equipo, herramientas y editoriales. Su capacidad generadora de ingresos supera los 3 mil 350 millones de dólares; equivalente a más de 13 % de todas las exportaciones producidas en la entidad federativa.

De acuerdo con la información generada por el Censo General de Población y Vivienda de 2000, la Delegación Benito Juárez contó con 359 mil 334 habitantes en edad de trabajar (rango comprendido entre los 12 años de edad y mayores),

de los cuales se establece una población económicamente activa (PEA) del orden de 175 mil 478 personas (51.98%), de las cuales, 95 mil 678 fueron varones y 76 mil 510 mujeres. Como desempleados, se registraron 3 mil 290 residentes.

Tendencia marcada entonces, y que por carecer de datos fidedignos, presumimos se mantiene igual: la PEA es superior a la mitad de la población residente; 55% hombre y 45% mujeres.

En cuanto a los ingresos, el 40.7% de la PEA goza de ingresos mayores a 2 salarios mínimos (S.M.); 17.6% percibe entre los 3 y los 5 S.M.; y caso excepcional, 24% cuenta con ingresos superiores a los 5 S.M. Si sumamos los porcentajes de ingresos medios y superiores, el 41.7% de la población activa percibe ingresos altos, que en su comparativo con el Distrito Federal, es prácticamente del doble, considerado en el orden de 21.3%.

En la actualidad, año 2000, los principales indicadores socioeconómicos en la Delegación Benito Juárez, indican que, el nivel de ingreso en la delegación se presenta en dos grandes sectores: en el área central de la demarcación el salario mensual es de 20 mil a 49 mil pesos, en tanto en su periferia, los extremos oeste y este es de 5 mil a 20 mil pesos.

#### 4.1.3 Infraestructura de la Delegación

La Delegación Benito Juárez es una de las delegaciones con mayor nivel de urbanización en el Distrito Federal.

Datos estadísticos	
<b>Energía eléctrica:</b>	99.9 %
<b>Agua Potable:</b>	98.9 %
<b>Drenaje:</b>	98.6 %
<b>Carpeta Asfáltica:</b> Ocupa el primer lugar en superficie de carpeta en el D. F. Representa el 18% del Distrito Federal (115.50 km <sup>2</sup> )	14.98 km <sup>2</sup>
<b>Vialidad Primaria:</b> Es el segundo lugar en la concentración de vialidades primarias en el D. F. Representa el 15% al D. F. (602 km)	89.52 km
<b>Áreas Verdes</b> Representa el 5.67 % del territorio de la Delegación y el 3 % respecto a las áreas verdes del Distrito Federal	1.51 km <sup>2</sup>

Fuente: [www.delegacionbenitojuarez.gob.mx](http://www.delegacionbenitojuarez.gob.mx)

#### 4.1.4 Uso de suelo y vivienda

En un territorio de 26.63 Km<sup>2</sup> de superficie (1.785 del DF.), el 85% de los predios corresponden al uso de suelo habitacional y comercial; el 1.8% es del uso industrial y el 12.6% restante, corresponde a equipamiento urbano. En las 2 mil 663 hectáreas que comprenden el territorio de la Delegación Benito Juárez, se conforman 56 colonias, con 2 mil 210 manzanas y un millón 511 mil 486 metros cuadrados de áreas verdes.

En materia de vivienda, en la demarcación existen 115 mil 879 viviendas particulares, de los cuales 45 mil 200 (40%) son rentados, haciéndose patente en algunas zonas los problemas de hacinamiento, precariedad y deterioro en las colonias ubicadas al oriente y norponiente de la demarcación, tales como Ocho de Agosto, Nonoalco, Niños Héroes, San Simón Ticumac, Américas Unidas e Independencia, donde se concentran un importante número de vecindades y viviendas antiguas.

Según datos de marzo de 2000, del total de viviendas registradas en la demarcación, el 72.1% (83,186) corresponden a departamentos en edificios, casa en vecindario o cuartos de azotea y sólo el 25.8% (29,818) corresponden a casas solas. El resto, 2.1% es vivienda colectiva no especificada.

Datos estadísticos	
Número de viviendas:	113,441
Viviendas Particulares:	99.9%
Residentes por vivienda promedio:	3.1
Viviendas construidas con materiales adecuados:	93.9%
Viviendas que cuentan con agua intra domiciliaria:	99.2 %
Viviendas que cuentan con drenaje conectado a la red	99.5 %
Viviendas que poseen energía eléctrica	100 %
La religión católica representa el 88% de su población	
El 1.8% de la población residente en la delegación habla alguna lengua indígena además de español	

Fuente: [www.delegacionbenitojuarez.gob.mx](http://www.delegacionbenitojuarez.gob.mx)

Con respecto al número de habitantes que las ocupa, es bajo; promediándose en 3.09 el número de habitantes por vivienda, máxime si se considera que 85.7% lo forman de 1 a 5 miembros; el 9.6% de 6 a 7; el 2.9% de 8 a más. Datos que pueden implicar que un número importante de personas viven solas, no tienen hijos o la familia promedia de 1 a 3 miembros. O bien, una cantidad

representativa de departamentos o casas, reportadas como viviendas, en realidad tienen uso de suelo o giro diferente.

En términos reales, el promedio de ocupantes por vivienda ha decrecido históricamente. En comparación con la década de los setentas, cuando existía un promedio de 5.1 miembros por vivienda, en 1990 apenas alcanza el índice del 3.5. Si se mantuviera esta tendencia, para el año 2000 podría haberse reducido a 3 o menos, el número de habitantes por vivienda.

En cuanto a las áreas verdes, se contabiliza una superficie de un millón 511 mil 486 metros cuadrados, constituida por 44 camellones, 10 ejes viales, 17 glorietas, 27 parques, 4 plazas, 3 tréboles, 10 triángulos y remanentes varios. En promedio, cada residente goza de un metro cuadrado de área verde.

#### 4.1.5 Justificación de la zona

La vida dentro de una ciudad depende de un sistema de transporte y en esta ciudad el principal modo de transporte es a través del automóvil. Si se tiene una red de viajes sin planeación, esta red encontrará la congestión rápidamente. Más aún, las soluciones de expansión por nueva geometría o crecimiento de la red, resultan muy costosas en términos de espacio de vía, energía, requisitos, seguridad e impacto ecológico.

Después de los estudios realizados por el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI), en la Encuesta de Origen y Destino de los Viajes de los Residentes del Área Metropolitana de la Ciudad de México en 1994, la Delegación Benito Juárez se localiza en el primer lugar de viajes generados, una de las principales razones se nota por las características socio-económicas de la región, la composición de esta delegación es principalmente de residencias particulares, contando sólo con otras estructuras de equipamiento urbano, las cuales cubren sus necesidades cotidianas, entonces los viajes que se generan son hacia otras delegaciones con motivos de trabajo o esparcimiento.

Del análisis estadístico para los viajes de los residentes del área metropolitana de la Ciudad de México, en un modo de transporte por distrito de origen y destino según los 50 pares de distritos con mayor incidencia de viajes por automóvil, se encuentra que las colonias que componen la delegación integran 16 de los 50 lugares, ya sea generados o atraídos denotando que dentro de esta Delegación el uso de las vialidades primarias usadas para destino final o de origen son utilizadas frecuentemente con un total de 1 53,723 viajes (Anexo – Tabla I), y siendo la segunda Delegación con mayor concentración de vialidades principales con esa cantidad de viajes atraídos y generados, encontrará problemas de tráfico en horas pico.

Un conductor que habite dentro de esta Delegación debe tener un lugar donde residir, un trabajo o lugar de esparcimiento como destino, un modo de transporte



que en su generalidad es un automóvil, una frecuencia de viajes hacia el trabajo, compras o esparcimiento, y un tiempo para realizar estos viajes que genera.

Por estos factores y junto con las características que componen la población, nivel socio-económico y geografía de la Delegación, además de que está equipada con sistemas masivos de transporte, la planeación del transporte permite hacer un pronóstico en los cambios de los atributos del sistema.

#### 4.2 Datos Utilizados para realizar la simulación

Para realizar el diagnóstico y la detección de cruceros de conflicto, es necesario buscar donde las demoras para los usuarios no son las mínimas. La revisión se realiza en los periodos de máxima demanda, para que el movimiento vehicular se vea afectado con las pérdidas de velocidad y el sistema tienda a saturarse, así puede ocurrir congestión, provocando las demoras y colas asociadas a este funcionamiento.

Estas demoras son causadas por los dispositivos de control de tránsito, que interrumpen el flujo y la corriente vehicular de flujo continuo, ya sea la señalización de los semáforos o las señales de alto y/o ceda el paso.

Para considerar de manera apropiada este sistema, se debe tomar en cuenta la naturaleza de su comportamiento, ya que sus entradas y salidas varían con el tiempo. En este sentido, el comportamiento de la cola y los modelos necesarios para describirla, dependen de los siguientes elementos:

1. Las llegadas (o demanda) y/o las características de entrada. Estos datos son expresados en forma de tasas de flujo (i.e. vehículos por hora) o en intervalos de tiempo (segundos por vehículo). Su distribución puede ser de tipo probabilístico o determinístico.
2. Los servicios (o capacidad) y/o las características de salida. También estos datos pueden ser expresados como tasas de flujo o intervalos, y su distribución puede ser de tipo determinístico o probabilístico.
3. El procedimiento de servicio o disciplina de la cola. En los sistemas viales el comportamiento sigue el régimen de que el primero que llega es el primero que sale.

Bajo este enfoque de análisis de congestión, se necesitan datos de aforos de las principales avenidas, la tasa de servicio para las intersecciones y se trabaja con la disciplina, primero que entra es el primero que sale.

Para realizar el análisis en intersecciones y señalización con semáforo, se utiliza la metodología indicada en el "Manual de Capacidad de Carreteras".

En donde la capacidad de una intersección con semáforo, se define para cada acceso con la tasa de flujo máximo que puede pasar a través de la intersección,

y se mide en vehículos por hora, con base en flujos que tienen periodos pico de 15 minutos.

- Las condiciones prevalecientes del tránsito incluyen los volúmenes por tipo de movimiento (izquierda, directo, derecha), su composición vehicular (automóviles, autobuses y camiones), maniobras de estacionamiento, peatones y paradas de autobuses.
- Las condiciones prevalecientes de la calle, describen las características geométricas de los accesos en términos del número y ancho de carriles, pendientes y uso de carriles, incluyendo aquellos destinados a estacionamiento.
- Las condiciones prevalecientes del semáforo, incluyen la secuencia de fases, asignación de tiempos y el tipo de operación y control.

Para el análisis de la capacidad se requirieren datos de las fases de los cruces tomadas de campo en la hora pico, así como los datos de la geometría y carriles para cada uno de los enlaces entre cruces.

#### 4.3 Construcción del modelo de simulación

##### 4.3.1 Formulación del problema

El análisis del flujo vehicular describe la forma como circulan los vehículos en cualquier tipo de vialidad, lo cual permite determinar el nivel de eficiencia de funcionalidad.

El resultado del análisis del flujo vehicular, es el desarrollo de modelos microscópicos o macroscópicos que relacionan las diferentes variables como el volumen, la velocidad, densidad, el intervalo y el espaciamiento; y estos modelos son la base del desarrollo del concepto de capacidad y niveles de servicio aplicado a diferentes tipos de vialidades.

En caso de presentarse las demoras y las colas, como resultado del congestionamiento, es posible considerarlo como un fenómeno de espera, asociado comúnmente a un problema de tránsito.

Para proporcionar un mejor servicio en la forma de una vialidad más rápida y como el problema de la congestión sobre los principales ejes viales debe ser resuelto, se busca: formar menos longitud de cola y menos tiempo de espera para el flujo vehicular en las intersecciones de la red.

#### 4.3.2 Objetivos

El objetivo principal es realizar un diagnóstico del sistema apoyado en los datos de aforo, semaforización y geometría. El resultado es observar los niveles de servicio de las intersecciones y verificar su operación en un modelo de red.

El objetivo secundario se realizaría en caso de existir cruceros con bajo nivel de servicio; entonces, con base en el diagnóstico se diseñan las alternativas de solución para mejorar la agilidad vial.

Finalmente, presentar las alternativas de solución simuladas comparándolas con respecto al estado actual.

#### 4.3.3 Recolección de Datos

Los datos que se utilizaron fueron los siguientes:

- Los datos de aforos de las estaciones maestras permanentes de la Ciudad de México de 1999. Sólo se tomaron las principales avenidas de la Delegación.
- Los datos de aforos de campo. En los casos de que no se tuvieran los datos del cruce se realizaron los aforos entre las 800 y 900 horas, para determinar la carga vehicular en hora pico.
- La geometría del cruce en cuanto al número de carriles efectivos de cruce y de estacionamiento.
- Las fases de los semáforos en los cruceros considerados para el análisis.

Los datos que se consideran para el análisis son:

- Flujo de saturación: 1900 vehículos por hora por carril
- Ancho de carril: 3.6 metros
- Velocidad para vuelta: 25 kilómetros por hora
- Factor de crecimiento: 0.9
- Velocidad de Diseño: 50 kilómetros por hora

Y se realizan las siguientes consideraciones para los cálculos del programa:

- Mínimo de tiempo para una fase: 20 segundos
- Mínimo de tiempo para una fase de vuelta: 7 segundos
- Porcentaje de vehículos pesados: 2%
- Maniobras de bloqueo de autobuses por hora: 15

#### 4.3.4 Construcción del modelo

Sobre una plantilla de Autocad se pone la traza como fondo para marcar las intersecciones de la red. La escala considerada para la plantilla de la traza es

uno a uno, y como se ve en la Figura 4.1, se dibuja toda la malla de crucesos y enlaces que componen la red de análisis, para las vialidades principales que contiene la Delegación de estudio.



Figura 4.1

Las líneas marcadas representan los enlaces que se generan cuando entran en contacto las intersecciones. A partir de los enlaces, se determinan propiedades para ellos, como nombre y velocidad de diseño.

Para cada cruceo dentro de la red:

1. Se determina su geometría en número de carriles y carriles exclusivos para maniobras de vuelta.
2. Se alimentan los datos de aforo para los grupos de carriles, y aquellos de vueltas exclusivas. La inserción de estos datos, se puede realizar gráficamente como se muestra en la Figura 4.2

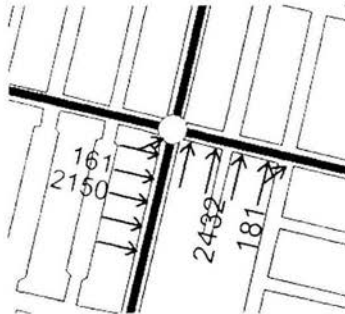


Figura 4.2

- Se ponen las fases de la semaforización actual. El primer dato es la longitud del ciclo completo, y luego dividido para los sentidos considerados. En caso de una fase exclusiva de vuelta se proporciona su tiempo como parte de la maniobra en su sentido. En la Figura 4.3 se puede apreciar como es la plantilla para los datos un cruce.

TIMING WINDOW	EBL	EBT	EBR	WBL	WBT	WBR	NBL	NBT	NBR	SBL	SBT	SBR	PED	HOLD
Lanes and Sharing (#RL)	←		█					→			↑			
Traffic Volume (vph)	161	2150	0	0	0	0	0	3729	229	0	20	0		
Turn Type	Perm													
Protected Phases	4							2		6				
Permitted Phases	4													
Detector Phases	4							2		6				
Minimum Initial (s)	4.0	4.0						4.0		4.0				
Minimum Split (s)	20.0	20.0						20.0		20.0				
Total Split (s)	60.0	60.0						70.0		70.0				
Yellow Time (s)	3.5	3.5						3.5		3.5				
All-Red Time (s)	0.5	0.5						0.5		0.5				

Figura 4.3

#### 4.3.5 Validación de la Simulación

La validación de la simulación se realizará por medio de una muestra aleatoria, como lo es el muestreo de un cruce por medio del cual se pueden hacer afirmaciones o negaciones basándose en una prueba de hipótesis. En vez de encontrar un estimador para el parámetro, por lo regular, se formulará una hipótesis sobre un valor para este estimador y se usará la información de la muestra para confirmar o rechazar el valor de la hipótesis.

Se considera que los arribos a un cruce son con tiempos exponenciales, los cuales, definen un comportamiento que se ajusta a una distribución tipo Poisson.

Entonces, para comparar dos estimadores (el real y el simulado) se formula:

El proceso A con una variable aleatoria X con una distribución Poisson, p para definir como A la longitud promedio de la cola del aforo real.

El proceso B con una variable aleatoria Y con una distribución Poisson para definir como B, la longitud promedio de cola de la simulación.

Se supone que se conoce la variabilidad intrínseca en cada uno de los procesos de medida por la varianza, se desea probar la hipótesis:

$$H_0 : \mu_x = \mu_y$$

contra la hipótesis alterna:

$$H_1 : \mu_x - \mu_y > 0$$

Se obtiene una muestra de tamaño n de X (para el aforo real) y sea:  $x_1, x_2, \dots, x_n$  y una muestra de tamaño m de Y (para la simulación) y sea:  $y_1, y_2, \dots, y_m$ . Se calculan los promedios muestrales  $\bar{X}$  y  $\bar{Y}$  y se vuelven a las pruebas anteriores: se rechaza  $H_0$  si  $\mu_x - \mu_y > C$ , donde C es una constante escogida de modo que la prueba tenga un nivel de significancia específica igual a  $\alpha$ .

En este caso específico, las pruebas de hipótesis se realizaron, con un  $\alpha$  iguales a 0.9, 0.95 y a 0.99.

La prueba realizada es la siguiente:

$$\frac{\sigma_{y_{simulada}} \left( t_{n-1, 1-\alpha} \right)}{\sqrt{n}} + \bar{X}_{real} > \bar{Y}_{simulada}$$

donde:

$\left( t_{n-1, 1-\alpha} \right)$  es el estadístico t de una distribución t-student. Con parámetros:  
 n-1 grados de libertad  
 1- $\alpha$  como intervalo de confianza para .9, .95 y .99

$\sigma_{y_{simulada}}$  es la desviación estándar para los datos de longitud promedio de cola simulada.

$n$  es el número de datos.

$\bar{X}_{real}$  es la media de la longitud de cola promedio real medida por aforos

$\bar{Y}_{simulada}$  es la media de la longitud de cola promedio generada por la simulación

Según la tabla 2 del anexo, la mayoría de las pruebas para la longitud promedio de colas generadas por la simulación en contra de las reales, pasan la prueba para los tres niveles de significancia.

Cuando una prueba de hipótesis presenta un fallo, este se rastrea para ver su motivo y por que no esta representando la realidad, los errores se deben principalmente a las siguientes situaciones:

- Las colas generadas entre intervalos de tramos muy largos se deben a que las unidades dentro del sistema no paran hasta la señalización, mientras que en la realidad, hay calles secundarias o alimentadoras con señalización que truncan esas colas.
- Hábitos de manejo propios de la región y tipo de conductor, donde la señalización no es obedecida en su totalidad.
- Aforos desactualizados para cruceros con mayor demanda local o regional.

#### 4.4 Diagnóstico de la situación actual

Durante la modelación del sistema actual, se generó el reporte del estado actual que medía el nivel de servicio según el Manual de Capacidad de carreteras donde califica el nivel de servicio por letras:

- Nivel de servicio A: representa una circulación a flujo libre. Los usuarios, considerados en forma individual, están exentos de los efectos de la presencia de otros en la circulación. Poseen la libertad para seleccionar velocidades deseadas y maniobrar dentro del tránsito. El nivel de comodidad es calificado como excelente.
- Nivel de servicio B: representa un flujo estable. La selección de velocidad deseada sigue casi inafectada pero la libertad de maniobras disminuye. El nivel de comodidad es inferior al nivel A por la influencia de otros conductores.
- Nivel de servicio C: es un flujo estable, pero la operación de usuarios individuales se ve afectada por las interacciones con otros usuarios. La selección de velocidad se ve afectada y se restringe la libertad de hacer maniobras. El nivel de comodidad y conveniencia desciende notablemente.





Avenida o Eje	Nivel de servicio global
Av. Colonia del Valle	C
Av. Coyoacán	C
Av. De los Insurgentes (N)	D
Av. De los Insurgentes (S)	C
Av. Universidad (N) antes Vertiz	D
Av. Universidad (S) antes Vertiz	F
Cumbres de Maltrata (N)	B
Cumbres de Maltrata (S)	B
Diagonal de San Antonio (E)	B
Diagonal de San Antonio (W)	B
División del Norte (N)	E
División del Norte (S)	D
Dr. Vertiz (N)	C
Dr. Vertiz (S)	C
Eje 1 Poniente	D
Eje 4 Sur	C
Eje 5 Sur	F
Eje 6 Sur	C
Eje 7 Sur	C
Eje 8 Sur	C
Gabriel Mancera	D
Jose María Rico	B
Lázaro Cárdenas	E
Mier y Pesado	B
Obrero Mundial (E)	D
Obrero Mundial (W)	B
Patriotismo	D
Rafael Donde	D
Revolución	B
Río Mixcoac	C
Xola	E

Tabla 4.3

Este nivel generalizado es el que representa un promedio global del eje con respecto a otros ejes que lo cruzan, bajo este promedio se encuentran los cruces conflictivos a lo largo del corredor.

Los cruces conflictivos se encuentran dentro de los niveles bajos de servicio como lo son el D, E y F, como ejemplo están: Avenida Universidad dirección Sur, División del Norte en dirección Norte, etc. Bajo el enfoque de simulación que se está proponiendo, para resolver los cruces conflictivos, se tiene que revisar la influencia de este cruce, tanto en el corredor, como a nivel red. De tal forma que si se mejora el nivel de servicio de ciertos cruces el nivel global de corredor será mejor y por tanto ofrece mayor comodidad a los usuarios de tales vías.

Como un promedio general de la zona, esta debe estar operando actualmente en un nivel de servicio D.

#### 4.5 Diseño de experimentos

Para la solución de generación de tráfico en los cruceros a partir del estado actual se proponen 2 alternativas:

La primera alternativa, es generar una red donde el experimento considera, la solución tradicional de mejorar cada cruceo independientemente, sin la influencia del que le precede ni del que le antecede. Esta solución nos generará una solución puntual y de sitio, con el propósito de resolver el problema local.

A la red vial se le asigna una zona única denominada A, la cual según los métodos ya expuestos, buscará el ciclo natural del cruceo y comenzará a asignar tiempo para mejorar su nivel de servicio. Cuando recorra las opciones (de 50 a 150 segundos por cruceo con incrementos) escoge el mejor ciclo, con base en las paradas generadas, el tiempo de recorrido y la longitud de cola generada.

También cabe hacer notar que aún cuando se resuelve de manera tradicional, al generar los reportes por medio del simulador, la solución producirá impactos por la relación que tiene el cruceo con otros cruceros señalizados cercanos a este o que tienen influencia con el, en especial el precedente y el antecedente.

La segunda alternativa, es seccionar la red en zonas, las cuales tengan características similares por influencia, carga o viajes. La zonificación de la malla vial, nos permite determinar qué tipo de influencia tienen otros cruceros con la zona de análisis. Para este problema, se elige zonificar con respecto a corredores viales principales.

La solución del conflicto dentro del corredor y con el objetivo de mejorar su nivel de servicio, bajo un enfoque de red vial trabajando en conjunto, toma como una regla de decisión que aquellos corredores viales para lo que el nivel de servicio sea igual o menor a D, se resuelvan considerándolos como una zona de análisis para optimización de la semaforización.

De la Tabla 4.3 se zonifica de la siguiente manera:

Zona	Corredor
1	Insurgentes
2	División del Norte
3	Eje 5 Sur
4	Lázaro Cárdenas
5	Xola
6	Eje 1 Poniente
7	Gabriel Mancera
8	Obrero Mundial

Tabla 4.4

Con esta asignación de zonas, hay algunos cruceros que pertenecen a 2 zonas al mismo tiempo. En esos casos, la prelación de flujo es la que dictamina cuál zona es la que le debe corresponder. Esta prelación se toma con base en el Reglamento de Tránsito del Distrito Federal y sus artículos, que determinan la preferencia de paso para los cruceros en conflicto.

Los cruceros que no están zonificados, se resolverán de forma tradicional como lo explicado en la alternativa anterior, sólo que, se le especifica que trate de mejorar la circulación con ajustes del diagrama espacio tiempo, esto es, que a diferencia del modelo tradicional este tomará en cuenta la circulación en el sentido que opera el corredor. Esta solución generará una diferencia en la longitud de cola promedio para otros cruceros, así como la influencia de la zona a lo largo de su recorrido, esta alternativa también producirá efectos a lo largo de la malla vial operando en conjunto.

## Capítulo 5. Análisis y Resultados

### 5.1 Resultados de las Alternativas

Con el fin de proporcionar un mejor nivel de servicio en una arteria, las alternativas generadas a través del simulador, resultan de los análisis técnicos de algunos cruceros durante la hora pico, que operan con un nivel de servicio bajo del cual son susceptibles de ser optimizados en sus parámetros: longitud de cola, velocidad promedio y nivel de servicio presentan mejoras; tanto de menor como mayor escala, dependiendo del rubro de análisis.

Entre los cruceros se encuentran algunos con capacidades en saturación provocando congestión y el ajuste de la semaforización, no es suficiente para resolver el problema, pero el ajuste de tiempo local en estos cruceros, proporciona un mejor nivel de servicio en cruceros cercanos por influencia de capacidad y de paso, en específico la alternativa 2 considera este aspecto.

El exceso de demanda que corresponde al estado actual de operación, en calles alimentadoras tratándose de incorporar a avenidas principales, o de las avenidas cuyos 2 sentidos cuando encuentran otra avenida y realizan maniobras de cruce y vuelta para todos sus sentidos, no cuentan con una optimización en cuanto al tiempo de fase propuesto, ya que este se encuentra en un punto muy cercano al estado actual, el cual marca que es necesario un cambio a grado de nivel o geometría. Estos cruceros resultan los más conflictivos por las maniobras de vuelta izquierda o derecha, tales maniobras merecen una solución de geometría para resolver el conflicto, más que una mejora en la señalización.

El Anexo 3 condensa en una tabla, las colas promedio generadas por cada una de las alternativas, verificando que las alternativas diseñadas pueden disminuir la cola promedio presentada en el cruce.

### 5.2 Propuesta de nuevas fases

#### 5.2.1 Detalle de las corridas

Para cada intersección que esté señalizada con un semáforo, se genera un reporte, que contiene, características del cruce según el tipo de señal y los tiempos para las fases de movimiento (cruce o vuelta).

A continuación se presenta la tabla 5.1, este es un reporte de una intersección en formato de salida de texto a para 2 vialidades. A partir de estas tablas se generan las distintas fases para los cruceros en estudio. La red que compone el estudio realizado a la Delegación Benito Juárez contiene 102 cruceros, de los cuales 74 están señalizados por medio de un semáforo. En los reportes generados para el estado actual, la alternativa 1 y la 2, son comparadas en cuanto a los tiempos de fase, y como se esperaba, los tiempos se mejoran

cuando: para la alternativa 1, el ciclo se disminuye a su ciclo natural de operación; y para la alternativa 2, cuando se mejora el tiempo de trayecto necesario para recorrer la distancia entre dos señales provocando una mejora a la continuidad en el diagrama espacio-tiempo conforme a la zonificación propuesta y la preferencia de paso en dirección.

2: Eje 8 Sur & Division del Norte	
5:00 pm Baseline	27/08/2003

Timing Report, Sorted By Phase
Cycle Length: 102
Control Type: Pretimed
Natural Cycle: 60
Offset: 0 (0%), Referenced to phase 2:NBT and 6:SBTL, Start of Green

Phase Number	2	4	6
Movement	NBT	EBTL	SBTL
Lead/Lag			
Lead-Lag Optimize			
Recall Mode	Max	Max	Max
Maximum Split (s)	55	47	55
Maximum Split (%)	54%	46%	54%
Minimum Split (s)	20	20	20
Yellow Time (s)	3.5	3.5	3.5
All-Red Time (s)	0.5	0.5	0.5
Minimum Initial (s)	4	4	4
Vehicle Extension (s)	3	3	3
Minimum Gap (s)	3	3	3
Time Before Reduce (s)	0	0	0
Time To Reduce (s)	0	0	0
Walk Time (s)	5	5	5
Flash Dont Walk (s)	11	11	11

Tabla 5.1

Dentro de cada reporte, existen diferentes campos, para el estudio realizado sólo nos interesan ciertos campos, los cuales, son los siguientes:

- Número de fase: este número de fase es determinado según el número de carriles y la dirección. Es un identificador que contempla un máximo de 8 direcciones.
- Movimiento: es la dirección con respecto a un eje de referencia el recorrido que realiza el eje o calle, hasta la intersección y la forma que tiene al finalizar.

- Tiempo de verde y porcentual: este valor es el tiempo de verde efectivo con el que cuenta la intersección para que cada pelotón realice la maniobra que necesita completar dentro del cruce. El porcentaje representa la razón que tiene este tiempo de verde con respecto al ciclo total.
- Tiempo de Ámbar: es el tiempo con el que se cuenta para que un conductor realice la maniobra de frenado.
- Tiempo de rojo total: es el tiempo en que los dos semáforos se encuentran al mismo tiempo en rojo.

Así que para cada una de las corridas generadas se puede leer un nuevo ciclo de la siguiente forma:

Splits and Phases: 2: Eje 8 Sur & Division del Norte

↑ a2	→ a4
55 s	47 s
↓ a6	
55 s	

De donde se puede tomar las nuevas fases de semaforización para ser implantadas.

### 5.3 Comparación entre las alternativas

A partir del Anexo 3 y 7 donde se capturaron las longitudes promedio de cola simuladas se generan 4 gráficas, las cuales contemplan los cuatro sentidos de recorrido de la malla vial, norte, sur, este y oeste. Entre ellas se visualiza cómo hay una mejora en comparación con el estado actual. Estas gráficas se deben consultar conjuntamente, ya que en algunos cruces para la alternativa 2, cuando aparentemente hay un aumento en la generación de cola promedio por carril, el o los otros sentidos involucrados en ese cruce, por las reglas de prelación para el paso de flujo vial dentro de la red, este otro sentido presenta la mejora que se busca como objetivo para modificar la señalización.

En cuanto al nivel de servicio, también se presenta una mejora con respecto a la situación actual, es decir, hay una mejora entre la alternativa 0 y 1, así como entre la alternativa 0 y 2; sin embargo, entre la alternativa 1 y 2, no hay una mejora aparente. Se tuvo que analizar el nivel de servicio a nivel local para comprobar que la propuesta de mejora por trabajar con una malla era mejor que el método tradicional.

Avenida o Eje	Nivel de serv. Global	Alternativa 1	Alternativa 2
Av. Colonia del Valle	C	C	C
Av. Coyoacan	C	C	C
Av. De los Insurgentes (N)	D	C	C
Av. De los Insurgentes (S)	C	C	C
Av. Universidad (N) antes Vertiz	D	D	D
Av. Universidad (S) antes Vertiz	F	D	E
Cumbres de Maltrata (N)	B	C	C
Cumbres de Maltrata (S)	B	B	B
Diagonal de San Antonio (E)	B	B	B
Diagonal de San Antonio (W)	B	B	B
División del Norte (N)	E	C	C
División del Norte (S)	D	C	C
Dr. Vertiz (N)	C	C	C
Dr. Vertiz (S)	C	B	B
Eje 1 Poniente	D	C	C
Eje 4 Sur	C	C	C
Eje 5 Sur	F	D	D
Eje 6 Sur	C	B	B
Eje 7 Sur	C	C	C
Eje 8 Sur	C	C	C
Gabriel Mancera	D	B	B
Jose María Rico	B	B	B
Lazaro Cárdenas	E	C	C
Mier y Pesado	B	B	B
Obrero Mundial (E)	D	C	D
Obrero Munidal (W)	B	A	B
Patriotismo	D	B	B
Rafael Donde	D	C	C
Revolución	B	B	B
Rio Mixcoac	C	C	C
Xola	E	D	E

Tabla 5.2

Según la tabla 5.2, se presenta los promedios de cada una de las vialidades que componen la red vial y los niveles de servicio global que presentan. En contraste, el anexo 5 desglosa el nivel de servicio a nivel local, y se aprecian las variaciones que se dan cruce por cruce para el nivel de servicio y para la velocidad esperada para ese cruce.

También se generan los reportes que nos proporcionan la información de las alternativas en cuanto a paradas, velocidad promedio, tiempo de viaje, distancia recorrida, combustible consumido, economía de combustible, emisiones de monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, e hidratos de carbono.

La tabla del Anexo 6, esta condensa los resultados para toda la red. Se puede apreciar que los retrasos por intersección, se ven reducidos hasta un poco más de la mitad para la alternativa 1 y casi la mitad para la alternativa 2. Esto marca que la pérdida de tiempo en recorrer los cruceros ha disminuido y mejorado. Con una mejora en los tiempos de viaje, ayudamos a que se recuperen horas – hombre que se desperdician durante el traslado que los usuarios actualmente ocupan. La mejora para el retraso generado por la señalización es de un 50% representando un ahorro de tiempo del 30%.

El promedio de paradas por señal se compara que en el estado actual de operación es casi seguro hacer una parada por crucero, en cambio en las alternativas generadas, nos acercamos a poder encontrar un flujo estable para un crucero y parar al siguiente, representando una parada por cad 2 cruceros.

También en otras áreas se presentan mejoras: para el desempeño, se incrementa la velocidad dentro de la red con un incremento de casi un 50%, y disminuimos el tiempo de viaje para los usuarios, además de proporcionarles un ahorro en el combustible del orden del 25%, generando menos consumo por vehículos parados.

En el rubro de impacto ambiental, también hay un beneficio por la reducción de emisiones al ambiente, en las tres emisiones que maneja, monóxido de carbono, bióxido de nitrógeno e hidratos de carbono; resultan disminuidos por la implantación de esta nueva señalización en 24% promedio para los tres contaminantes. Con esta reducción se contribuye a la reducción de trastornos en la salud por. Hay que hacer notar que estas emisiones consideras son para automóviles medianos con un consumo estándar y que cuentan con tecnología ambiental. Esta cifra puede ser mayor dada la composición del parque vehicular propia de la Delegación. Sin embargo, estas variaciones del parque no impactan el ahorro y la mejora global que esta nueva señalización representa.

ESTA TESIS NO SALE  
DE LA BIBLIOTECA



## Conclusiones y Recomendaciones

La principal conclusión a la que se llega al haber realizado este estudio, es que la simulación como herramienta ofrece la capacidad de optimización sobre un sistema dinámico como lo es una red de transporte señalizada.

Después de hacer la descripción geográfica, demográfica y vial de la zona de estudio, que comprende la Delegación Benito Juárez, se proporciona una micro zonificación, para resolver los problemas de congestión de mayor a menor, buscando una mejora a nivel zona más que puntual, aún cuando se revisó esa alternativa.

Se tomaron en cuenta factores teóricos pero que reflejaron en buena medida la situación actual, y baja sensibilidad durante la validación por medio de la prueba de hipótesis.

Los modelos manejados dentro de Synchro son determinísticos, y no son sensible a la variación geométrica como la aceleración, en cambio SimTraffic considera estas variaciones geométricas para determinar el grado de desempeño que el cruce tiene y liga esta información con los demás cruces adyacentes para proporcionar el trabajo de toda una malla vial, concluyendo que la micro simulación ofrece mejores resultados en este tipo de estudios.

La implementación y uso de software de simulación proporcionaría otras ventajas, como lo son:

- Generación de escenarios
- Mantenimiento de la señalización

Entonces, se recomienda, generar evaluaciones comparativas para el manejo estrategias de operación en el área de señalización, e inclusive puede ser una herramienta para la evaluación de situaciones donde se añadan o eliminen carriles y así verificar la eficacia de los señalamientos de control y la regularización de la velocidad.

También aunque este estudio proporciona un panorama de la congestión que ocurre durante las horas pico, y es de carácter recurrente, el modelo de simulación no explora otro tipo de congestión a consecuencia de incidentes como colisiones, mantenimiento vial, construcción y otros. Por consiguiente, se recomienda ampliar la metodología de estudio para contemplar estos incidentes y si es posible incorporar la información de los efectos de estos incidentes sobre las vialidades.

Es posible que para mejorar el nivel de confianza que la simulación nos puede otorgar, aún cuando la naturaleza de los modelos de simulación es un análisis extenso de datos de entrada, se consideren calles secundarias y locales para mejorar el comportamiento global de la red.

## ANEXO 1

### VIAJES DE LOS RESIDENTES DEL AMCM EN UN MODO DE TRANSPORTE POR DISTRITO DE ORIGEN Y DESTINO, SEGUN LOS 50 PARES DE DISTRITOS CON MAYOR INCIDENCIA DE VIAJES EN AUTOMOVIL

ORDEN DE INCIDENCIA	DISTRITO DE ORIGEN	DISTRITO DE DESTINO	NUMERO DE VIAJES	
	TOTAL		4,841,906	
1	VERTIZ NARVARTE	DEL VALLE	17,980	17,980
2	DEL VALLE	VERTIZ NARVARTE	17,424	17,424
3	SATELITE	SAN MATEO	17,136	
4	SAN MATEO	SATELITE	16,950	
5	ECHEGARAY	SATELITE	14,636	
6	SATELITE	ECHEGARAY	13,868	
7	CIUDAD DE LOS DEPORTES	DEL VALLE	11,374	11,374
8	DEL VALLE	SAN ANGEL INN	11,231	11,231
9	PORTALES	DEL VALLE	10,745	10,745
10	CHAPULTEPEC	LAS LOMAS	10,388	
11	SAN ANGEL INN	CIUDAD DE LOS DEPORTES	10,343	10,343
12	LA PIEDAD	LECHERIA	9,476	
13	LECHERIA	LA PIEDAD	8,902	
14	LAS LOMAS	CHAPULTEPEC	8,855	
15	DEL VALLE	PORTALES	8,746	8,746
16	DEL VALLE	CIUDAD DE LOS DEPORTES	8,348	8,348
17	POLITECNICO	LINDAVISTA	8,163	
18	CONDESA	ZONA ROSA	7,960	
19	CIUDAD DE LOS DEPORTES	SAN ANGEL INN	7,939	7,939
20	CIUDAD DE LOS DEPORTES	ZONA ROSA	7,701	7,701
21	DEL VALLE	VIVEROS	7,523	7,523
22	VERTIZ NARVARTE	CONDESA	7,357	7,357
23	LINDAVISTA	POLITECNICO	7,332	
24	LA NORIA	COAPA	7,191	
25	ZONA ROSA	CHAPULTEPEC	7,149	
26	SATELITE	CALACOAYA	7,138	
27	ZONA ROSA	CONDESA	7,087	
28	CALACOAYA	SATELITE	7,070	
29	VIVEROS	DEL VALLE	7,058	7,058
30	SAN ANGEL INN	CAMPESTRE CHURUBUSCO	6,966	
31	ZONA ROSA	CIUDAD DE LOS DEPORTES	6,953	6,953
32	COAPA	VILLA OLIMPICA	6,743	
33	SAN MATEO	ECHEGARAY	6,741	
34	CTM CULHUACAN	COAPA	6,695	
35	VIVEROS	SAN ANGEL INN	6,655	
36	SAN ANGEL INN	VIVEROS	6,523	
37	CONDESA	VERTIZ NARVARTE	6,501	6,501
38	SAN ANGEL INN	DEL VALLE	6,500	6,500
39	COAPA	LA NORIA	6,328	
40	POLITECNICO	LA VILLA	6,267	
41	VILLA OLIMPICA	CIUDAD UNIVERSITARIA	6,238	
42	CHAPULTEPEC	ZONA ROSA	6,199	
43	COAPA	CTM CULHUACAN	6,144	
44	CIUDAD UNIVERSITARIA	VILLA OLIMPICA	6,098	
45	CHAPULTEPEC	CONDESA	6,077	
46	CAMPESTRE CHURUBUSCO	SAN ANGEL INN	6,008	
47	ECHEGARAY	CALACOAYA	5,997	
48	SANTA MONICA	MAZA DE JUAREZ	5,985	
49	MAZA DE JUAREZ	SANTA MONICA	5,964	
50	SAN ANGEL INN	COAPA	5,949	
	OTROS DISTRITOS	OTROS DISTRITOS	4,415,305	153,723

NOTA: No incluye viajes realizados por menores de 6 años. Incluye automóviles y camionetas para uso privado.

FUENTE: INEGI. Encuesta de Origen y Destino de los Viajes de los Residentes del Área Metropolitana de la Ciudad de México, 1994.

# ANEXO 2 - Prueba de Hipotesis

Conteo G. Liberud 10.9 10.95 10.99

2	1	3.1	6.3	31.6
3	2	1.9	2.9	7.0
4	3	1.6	2.4	4.5
5	4	1.5	2.1	3.7

# Int	Dirección	Long. de cola simulado					Meda	Desv.
2	Este	67.1	58.3	58.4	58.3	48.5	57.8	7.3
	Oeste						0.0	0.0
	Norte	64.2	63.3				63.6	0.6
	Sur	16.2	18.8				16.0	0.3
3	Este	55.1	44.9				50.0	7.2
	Oeste	76.2	76.1				77.7	2.2
	Norte	67.0	60.7				63.9	4.5
	Sur	16.9	19.1				19.0	0.1
6	Este	52.7	46.6	45.4	42.8	44.3	46.4	3.6
	Oeste						0.0	0.0
	Norte						0.0	0.0
	Sur	25.9	20.0	14.3	10.3	10.8	16.2	8.7
7	Este	99.3	91.1	83.3	76.1	73.1	85.0	10.4
	Oeste						0.0	0.0
	Norte	132.4	129.6	131.0			131.1	1.3
	Sur	99.4	89.9	90.3			93.2	5.4
8	Este	126.0	131.9	131.6	55.1		112.1	38.0
	Oeste						0.0	0.0
	Norte						0.0	0.0
	Sur	101.6	95.4	114.1			103.7	9.5
9	Este	36.4	36.2				36.3	0.1
	Oeste						0.0	0.0
	Norte	104.1	105.2	85.5			91.6	22.6
	Sur	55.8	51.1	50.0			52.3	3.1
10	Este	56.7	45.4	40.2	39.8	41.3	44.7	7.1
	Oeste						0.0	0.0
	Norte	14.9	80.2	74.6	73.3		80.8	30.7
	Sur	87.8	76.5	69.1			77.8	9.4
13	Este						0.0	0.0
	Oeste	27.7	21.6	33.2			27.6	5.7
	Norte	1.8	1.8				1.8	0.0
	Sur						0.0	0.0
14	Este	44.6	45.5				45.1	0.8
	Oeste						0.0	0.0
	Norte	49.2	44.0				46.6	3.7
	Sur	48.3	43.5	44.0	41.3	42.0	43.4	1.9
19	Este						0.0	0.0
	Oeste	52.2	23.4	18.5	18.0	26.0	27.8	14.1
	Norte	90.2	73.6	90.5			71.4	19.9
	Sur	77.6	71.6	70.0			73.1	4.0
21	Este						0.0	0.0
	Oeste	16.7	17.2	20.3	14.0	20.0	17.6	2.6
	Norte						0.0	0.0
	Sur	12.4	13.2	13.9	12.4	15.0	13.4	1.1

Long. de cola real					Meda	Desv.
59.0	60.1	60.1	56.0	61.3	58.9	1.0
78.3	77.1				77.7	0.8
35.8	34.6				35.2	0.6
56.7	56.7				56.7	0.0
79.9	81.1				80.5	0.8
46.7	47.8				47.2	0.8
54.9	52.7				53.8	1.6
52.4	53.6	54.7	54.7	52.4	53.6	1.1
					0.0	0.0
					0.0	0.0
41.6	43.0	40.7	40.7	41.8	41.6	1.0
88.4	89.6	90.7	85.4	88.4	89.1	1.0
					0.0	0.0
136.7	137.8	139.0			137.8	1.1
128.2	127.1	128.2			127.9	0.7
130.7	131.9	133.0	131.9		131.9	0.9
					0.0	0.0
					0.0	0.0
90.6	91.8	90.6			91.0	0.7
					0.0	0.0
					0.0	0.0
131.8	130.1	128.9			130.3	1.4
44.6	45.7	44.6			45.0	0.7
43.7	44.8	48.2	47.1	41.4	45.0	2.7
					0.0	0.0
65.0	62.7	65.0	63.6		64.1	1.1
94.3	93.4	90.7			93.5	2.5
					0.0	0.0
34.0	34.0	35.2			34.4	0.7
11.7	11.7				11.7	0.0
					0.0	0.0
43.4	44.5				43.9	0.8
					0.0	0.0
47.1	48.3				47.7	0.8
37.4	40.9	39.7	39.7	38.6	39.3	1.3
40.9	42.1	43.2	40.9	39.8	41.4	1.3
75.2	76.3	72.9			74.8	1.7
86.2	86.5	87.4			87.4	1.1
					0.0	0.0
					0.0	0.0
					0.0	0.0

n	n-1	Prueba 90%	Prueba 95%	Prueba 99%
5	4	64.92 PASA	66.88 PASA	72.18 PASA
0	0	0.00 0	0.00 0	0.00 0
2	1	79.10 PASA	78.11 PASA	82.03 PASA
2	1	35.83 PASA	35.39 PASA	41.57 PASA
2	1	75.37 PASA	64.22 PASA	221.96 PASA
2	1	85.26 PASA	81.90 PASA	129.84 PASA
2	1	56.93 FALLO	50.05 FALLO	147.47 PASA
2	1	54.11 PASA	53.89 PASA	56.86 PASA
5	4	56.19 PASA	54.39 PASA	59.96 PASA
0	0	0.00 0	0.00 0	0.00 0
0	0	0.00 0	0.00 0	0.00 0
5	4	46.16 PASA	43.00 PASA	52.77 PASA
5	4	96.25 PASA	91.33 PASA	105.56 PASA
0	0	0.00 0	0.00 0	0.00 0
3	2	139.25 PASA	136.21 PASA	143.06 PASA
3	2	133.71 PASA	129.43 PASA	149.47 PASA
4	3	162.95 PASA	140.79 PASA	218.08 PASA
0	0	0.00 0	0.00 0	0.00 0
0	0	0.00 0	0.00 0	0.00 0
3	2	101.36 FALLO	93.77 FALLO	129.29 PASA
0	0	0.00 0	0.00 0	0.00 0
0	0	0.00 0	0.00 0	0.00 0
3	2	154.88 PASA	136.81 PASA	221.18 PASA
3	2	48.40 FALLO	45.90 FALLO	57.80 PASA
5	4	49.89 PASA	46.54 PASA	56.89 PASA
0	0	0.00 0	0.00 0	0.00 0
4	3	89.29 PASA	71.35 PASA	133.90 PASA
3	2	103.70 PASA	96.20 PASA	131.32 PASA
0	0	0.00 0	0.00 0	0.00 0
3	2	46.62 PASA	36.08 PASA	57.34 PASA
2	1	11.72 PASA	11.72 PASA	11.72 FALLO
0	0	0.00 0	0.00 0	0.00 0
2	1	45.32 PASA	44.34 PASA	58.25 PASA
0	0	0.00 0	0.00 0	0.00 0
2	1	55.71 PASA	50.03 PASA	130.44 PASA
5	4	40.60 FALLO	39.68 FALLO	42.53 PASA
0	0	0.00 0	0.00 0	0.00 0
5	4	51.10 PASA	44.41 PASA	65.10 PASA
3	2	86.50 PASA	80.61 PASA	154.96 PASA
3	2	91.74 PASA	88.54 PASA	103.48 PASA
0	0	0.00 0	0.00 0	0.00 0
0	0	0.00 0	0.00 0	0.00 0
0	0	0.00 0	0.00 0	0.00 0
0	0	0.00 0	0.00 0	0.00 0







147	Este						0.0	0.0
	Oeste	21.7	13.3	13.1	5.9	4.4	11.7	6.9
	Norte						0.0	0.0
	Sur	56.8	55.7	3.6			30.7	30.4
148	Este	65.8	66.0	61.4	63.2	70.4	65.4	3.4
	Oeste						0.0	0.0
	Norte						0.0	0.0
	Sur	7.6	61.0	53.1	46.8		42.1	23.7
149	Este						0.0	0.0
	Oeste	25.8	78.6	74.1	66.6	72.8	64.6	21.7
	Norte						0.0	0.0
	Sur	30.9	29.7	20.0	19.7		25.1	6.1
150	Este						0.0	0.0
	Oeste	44.1	39.3				41.7	3.4
	Norte						0.0	0.0
	Sur	34.0	31.9	32.1			32.7	1.2
152	Este	52.0	42.8				47.4	6.5
	Oeste						0.0	0.0
	Norte	21.9	15.5				18.7	4.5
	Sur						0.0	0.0
157	Este	27.4	22.0	15.9			21.8	5.8
	Oeste						0.0	0.0
	Norte	38.8	29.6	24.5			31.0	7.2
	Sur	58.2	125.0	105.1			96.1	34.3
158	Este	11.1	9.5	0.4			7.0	5.8
	Oeste						0.0	0.0
	Norte	23.9	23.2				23.6	0.5
	Sur	74.6	67.6				71.1	4.9

							0.0	0.0
		27.3	26.2	26.2	26.2	25.1	26.2	0.8
							0.0	0.0
		56.9	59.2	60.4			58.8	1.7
		70.0	71.2	68.8	71.2	68.8	70.0	1.2
							0.0	0.0
							0.0	0.0
		52.9	52.9	54.0	52.9		53.1	0.6
							0.0	0.0
		72.4	71.3	71.3	72.4	71.3	71.7	0.8
							0.0	0.0
		34.6	35.8	35.8	34.6		35.2	0.7
							0.0	0.0
		45.6	45.6				45.6	0.0
							0.0	0.0
		35.3	36.5	36.5			36.1	0.7
							0.0	0.0
							0.0	0.0
							0.0	0.0
		33.7	32.8	32.8			33.0	0.7
							0.0	0.0
		95.6	94.7	97.0			95.6	1.1
		107.0	107.0	108.1			107.3	0.7
		17.7	17.7	18.9			18.1	0.7
							0.0	0.0
		34.2	34.2				34.2	0.0
		46.2	45.1				45.6	0.8

0	0
5	4
0	0
3	2
5	4
0	0
0	0
0	0
4	3
0	0
5	4
0	0
4	3
0	0
2	1
0	0
3	2
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
3	2
0	0
3	2
0	0
2	1
2	1

0.00	0
30.94	PASA
0.00	0
91.94	PASA
72.35	PASA
0.00	0
0.00	0
0.00	0
72.58	PASA
0.00	0
86.56	PASA
0.00	0
40.17	PASA
0.00	0
53.01	PASA
0.00	0
37.36	PASA
0.00	0
0.00	0
0.00	0
0.00	0
0.00	0
39.23	PASA
0.00	0
103.74	PASA
144.89	PASA
24.41	PASA
0.00	0
35.29	PASA
56.41	FALLO

0.00	0
27.67	PASA
0.00	0
67.72	PASA
70.74	PASA
0.00	0
0.00	0
0.00	0
58.73	PASA
0.00	0
76.34	PASA
0.00	0
36.63	PASA
0.00	0
47.77	PASA
0.00	0
36.44	PASA
0.00	0
0.00	0
0.00	0
0.00	0
0.00	0
0.00	0
34.65	PASA
0.00	0
97.96	PASA
117.36	PASA
19.81	PASA
0.00	0
34.53	PASA
48.77	FALLO

0.00	0
37.79	PASA
0.00	0
181.08	PASA
75.72	PASA
0.00	0
0.00	0
107.03	PASA
0.00	0
106.03	PASA
0.00	0
46.95	PASA
0.00	0
121.95	PASA
0.00	0
40.76	PASA
0.00	0
0.00	0
0.00	0
0.00	0
56.11	PASA
0.00	0
124.69	PASA
245.26	PASA
41.34	PASA
0.00	0
45.35	PASA
157.01	PASA





## ANEXO 4 Comparación del Nivel de Servicio Global

Avenida o Eje	Nivel de serv. Global	Alternativa 1	Alternativa 2
Av. Colonia del Valle	C	C	C
Av. Coyoacan	C	C	C
Av. De los Insurgentes (N)	D	C	C
Av. De los Insurgentes (S)	C	C	C
Av. Universidad (N) antes Vertiz	D	D	D
Av. Universidad (S) antes Vertiz	F	D	E
Cumbres de Maltrata (N)	B	C	C
Cumbres de Maltrata (S)	B	B	B
Diagonal de San Antonio (E)	B	B	B
Diagonal de San Antonio (W)	B	B	B
División del Norte (N)	E	C	C
División del Norte (S)	D	C	C
Dr. Vertiz (N)	C	C	C
Dr. Vertiz (S)	C	B	B
Eje 1 Poniente	D	C	C
Eje 4 Sur	C	C	C
Eje 5 Sur	F	D	D
Eje 6 Sur	C	B	B
Eje 7 Sur	C	C	C
Eje 8 Sur	C	C	C
Gabriel Mancera	D	B	B
Jose María Rico	B	B	B
Lazaro Cárdenas	E	C	C
Mier y Pesado	B	B	B
Obrero Mundial (E)	D	C	D
Obrero Mundial (W)	B	A	B
Patriotismo	D	B	B
Rafael Donde	D	C	C
Revolución	B	B	B
Rio Mixcoac	C	C	C
Xola	E	D	E

## ANEXO 5 Comparación nivel de servicio local y velocidad

Avenida o Eje	Crucero	Alternativa 0	Alternativa 1	Alternativa 2	Vel. Alt 0	Vel. Alt 1	Vel. Alt 2
Av. Colonia del Valle	Av. Coyoacan	C	C	C	20.7	23.1	23.1
Av. Colonia del Valle	Eje 5 Sur	B	B	B	32	33	33
Av. Coyoacan	División del Norte	B	D	D	34.2	14.7	14.6
Av. Coyoacan	Torres Adalid	D	D	D	15.4	15.8	15.8
Av. Coyoacan	Av. Colonia del Valle	D	B	B	14.1	30.5	30.5
Av. Coyoacan	Eje 5 Sur	C	C	C	27.1	21.3	21.3
Av. Coyoacan	Eje 6 Sur	C	B	B	20.6	33.6	33.6
Av. Coyoacan	Eje 7 Sur	B	A	A	37.2	41.7	41.7
Av. Coyoacan	Jose María Rico	C	B	B	24.4	29.8	29.8
Av. Coyoacan	Av. Universidad	B	C	C	31.5	20.1	20.1
Av. De los Insurgentes (N)	Río Mixcoac	F	D	D	8.2	17.7	17.7
Av. De los Insurgentes (N)	Eje 7 Sur	E	C	C	11.7	23.6	23.6
Av. De los Insurgentes (N)	Eje 6 Sur	B	B	B	38.4	34	34
Av. De los Insurgentes (N)	Eje 5 Sur	B	F	F	32.8	8.7	8.7
Av. De los Insurgentes (N)	Torres Adalid	D	B	B	15	37.9	37.9
Av. De los Insurgentes (N)	Xola	C	B	B	22.4	38.5	38.5
Av. De los Insurgentes (S)	Xola	E	C	C	13.6	20.4	20.4
Av. De los Insurgentes (S)	Filadelfia	B	B	B	32	38.7	38.7
Av. De los Insurgentes (S)	Eje 5 Sur	B	D	D	35.9	18.8	18.8
Av. De los Insurgentes (S)	Eje 6 Sur	B	C	C	35.1	20.6	20.6
Av. De los Insurgentes (S)	Eje 7 Sur	B	A	A	37.4	44.5	44.5
Av. De los Insurgentes (S)	Río Mixcoac	D	B	B	13.7	32.9	32.9
Av. Universidad (N) antes Vertiz	Eje 4 Sur	D	B	B	13.6	34.1	31
Av. Universidad (N) antes Vertiz	Lázado Cárdenas	D	E	E	18.6	11.6	11.8
Av. Universidad (S) antes Vertiz	Eje 4 Sur	F	D	E	6.6	16.5	10.8
Cumbres de Maltrata (N)	Eje 5 Sur	B	B	B	38.4	32.4	32.4
Cumbres de Maltrata (N)	Lázado Cárdenas	B	C	C	38.1	22.6	21
Cumbres de Maltrata (S)	Lázado Cárdenas	B	C	C	38.1	29	25.1
Cumbres de Maltrata (S)	Eje 5 Sur	B	C	C	38.7	26.3	27.4
Cumbres de Maltrata (S)	Eje 6 Sur	B	B	B	30.5	39	37.8
Diagonal de San Antonio (E)	Dr. Vertiz	B	B	B	29.9	31.1	31.1
Diagonal de San Antonio (E)	Eje 1 Poniente	B	A	B	34.1	43.5	35.9
Diagonal de San Antonio (W)	Dr. Vertiz	B	B	B	30.2	33	33
Diagonal de San Antonio (W)	Eje 1 Poniente	B	B	B	36.5	34.8	34.8
Diagonal de San Antonio (W)	Gabriel Mancera	B	B	B	34.4	34.4	34.4
División del Norte (N)	Eje 8 Sur	B	A	A	37.9	1	40.2
División del Norte (N)	Eje 7A Sur	B	A	A	30.5	12.5	42.5
División del Norte (N)	Dr. Vertiz	F	F	F	2.2	2.8	2.8
División del Norte (N)	Eje 7 Sur	F	B	B	8.1	32.9	32.9
División del Norte (N)	Eje 1 Poniente	A	A	A	39.5	46.2	46.2
División del Norte (N)	Eje 6 Sur	D	C	C	19.1	21.4	21.4
División del Norte (N)	Eje 5 Sur	F	B	B	8.1	32.4	32.4
División del Norte (N)	Gabriel Mancera	C	B	B	23.7	38	38
División del Norte (N)	Torres Adalid	B	B	B	38.4	29.9	29.9
División del Norte (N)	Mier y Pesado	F	F	F	1.6	6.2	6.2
División del Norte (N)	Xola	C	A	A	20.2	42.4	42.4
División del Norte (S)	Xola	F	C	C	5.8	21.6	21.6
División del Norte (S)	Mier y Pesado	C	B	B	29.6	38.4	38.4
División del Norte (S)	Torres Adalid	B	B	B	36.1	34.6	34.6
División del Norte (S)	Gabriel Mancera	F	D	D	6.7	19	19
División del Norte (S)	Eje 5 Sur	C	C	C	23.9	22.7	22.7
División del Norte (S)	Eje 6 Sur	D	B	B	18.7	35.8	35.8
División del Norte (S)	Eje 1 Poniente	F	F	F	5	7.4	7.4
División del Norte (S)	Eje 7 Sur	B	A	A	37.5	49.3	49.3
División del Norte (S)	Dr. Vertiz	A	A	A	43.9	39.7	39.7
División del Norte (S)	Eje 7A Sur	E	D	D	11.4	19.1	19.1
División del Norte (S)	Eje 8 Sur	C	B	B	24.8	30.9	30.8

Dr. Vertiz (N)	Eje 4 Sur	C	C	C	22.9	28.6	28.6
Dr. Vertiz (N)	Diag. de San Antonio	C	C	C	27.1	29.3	29.3
Dr. Vertiz (N)	Obrero Mundial	C	C	B	23.2	26.1	30.4
Dr. Vertiz (S)	Obrero Mundial	D	D	C	15.6	19.1	21.7
Dr. Vertiz (S)	Diag. de San Antonio	C	A	B	27.4	39.5	30.9
Dr. Vertiz (S)	Eje 4 Sur	C	A	B	23.6	39.6	36.8
Eje 1 Poniente	Obrero Mundial	F	C	C	9.1	23	23
Eje 1 Poniente	Eje 4 Sur	B	A	A	31.2	40.1	40.1
Eje 1 Poniente	Eje 5 Sur	D	C	C	17.9	28.8	28.8
Eje 1 Poniente	Eje 6 Sur	D	B	B	14.2	30.5	30.5
Eje 1 Poniente	División del Norte	D	F	F	17.8	9	9
Eje 1 Poniente	Eje 7 Sur	C	A	A	22.4	47.7	47.7
Eje 1 Poniente	Eje 7A Sur	D	B	B	17.5	33.1	33.1
Eje 1 Poniente	Eje 8 Sur	D	C	C	17.6	24.7	24.7
Eje 4 Sur	Xola	C	C	C	25.6	25.6	25.6
Eje 4 Sur	Mier y Pesado	C	B	B	22	38	33.6
Eje 4 Sur	Gabriel Mancera	C	D	D	24.2	24.2	19.9
Eje 4 Sur	Eje 1 Poniente	C	A	A	26.2	40.4	40.4
Eje 4 Sur	Dr. Vertiz	C	A	A	29.5	42.2	42.2
Eje 4 Sur	Av. Universidad	C	F	D	15.3	9.5	19.5
Eje 4 Sur	Lázaro Cárdenas	D	D	D	24.1	17	14.7
Eje 5 Sur	Cumbres de Maltrata	E	B	B	13	34.1	34.1
Eje 5 Sur	Lázaro Cárdenas	F	F	F	6.7	6.6	6.3
Eje 5 Sur	Dr. Vertiz	D	D	E	14.8	19.4	12.9
Eje 5 Sur	Av. Universidad	F	F	F	7.7	9.4	9.4
Eje 5 Sur	Eje 1 Poniente	D	E	E	14.3	10.5	10.5
Eje 5 Sur	División del Norte	D	B	B	17.8	31.9	31.9
Eje 5 Sur	Gabriel Mancera	E	D	D	10.8	17.2	17.2
Eje 5 Sur	Av. Coyoacan	F	B	B	7.6	35.7	35.7
Eje 5 Sur	Av. Col. Del Valle	F	B	B	4.9	38.9	38.9
Eje 5 Sur	Av. Insurgentes	F	E	E	5.1	11.8	11.8
Eje 5 Sur	Patriotismo	B	A	A	34.4	44.3	44.3
Eje 5 Sur	Revolución	C	C	C	21.6	24.8	24.8
Eje 6 Sur	Patriotismo	C	C	C	22.6	23.1	23.1
Eje 6 Sur	Av. Insurgentes	F	B	B	10.3	34.4	34.4
Eje 6 Sur	Av. Coyoacan	B	A	A	36.3	48.8	48.8
Eje 6 Sur	Gabriel Mancera	C	C	C	21.9	22.1	22.1
Eje 6 Sur	División del Norte	B	A	A	30.2	41.8	41.8
Eje 6 Sur	Eje 1 Poniente	E	D	D	11.5	17.7	17.7
Eje 6 Sur	Av. Universidad	E	C	C	12.4	20.3	20.3
Eje 6 Sur	Dr. Vertiz	C	B	B	28	31.3	31.3
Eje 6 Sur	Lázaro Cárdenas	C	C	C	25.7	24	22.8
Eje 7 Sur	Lázaro Cárdenas	B	B	C	30.6	31.2	27.4
Eje 7 Sur	Dr. Vertiz	B	B	B	29.9	38.5	30.9
Eje 7 Sur	División del Norte	D	E	E	15.8	10.8	10.9
Eje 7 Sur	Eje 1 Poniente	C	A	A	28.2	40.2	40.2
Eje 7 Sur	Av. Universidad	E	F	F	11.9	8.2	8.2
Eje 7 Sur	Gabriel Mancera	C	B	B	22.6	36.9	36.9
Eje 7 Sur	Av. Coyoacan	C	B	B	22.7	38.6	38.6
Eje 7 Sur	Av. Insurgentes	B	C	C	33.9	29.5	29.5
Eje 7 Sur	Patriotismo	B	B	B	32	33.2	33.2
Eje 7 Sur	Revolución	F	F	F	3.4	10	10
Eje 8 Sur	Av. Universidad	E	F	F	10.5	5	5
Eje 8 Sur	Eje 1 Poniente	C	B	B	24.3	37.2	37.2
Eje 8 Sur	División del Norte	B	A	A	33.7	47.1	47.1
Eje 8 Sur	Lázaro Cárdenas	C	E	E	21	10.9	11.2

Grabriel Mancera	Eje 8 Sur	B	B	B	33.5	32.7	32.7
Grabriel Mancera	Eje 7 Sur	C	B	B	26.7	33.7	33.7
Grabriel Mancera	Eje 6 Sur	B	A	A	35.9	48.1	48.1
Grabriel Mancera	Eje 5 Sur	C	D	D	22.8	18.8	18.8
Grabriel Mancera	División del Norte	C	C	C	22.9	26.3	26.3
Grabriel Mancera	Diag. De San Antonio	D	B	B	16.3	37.1	37.1
Grabriel Mancera	Eje 4 Sur	E	B	B	10.9	32.4	32.4
Grabriel Mancera	Obrero Mundial	F	D	D	8.9	19	19
Jose Maria Rico	Av. Coyoacan	B	B	B	34.4	35.3	35.3
Jose Maria Rico	Gabriel Mancera	C	A	A	22	39.9	39.9
Lazaro Cárdenas	Eje 8 Sur	D	C	C	14.7	25.7	26.4
Lazaro Cárdenas	Eje 7A Sur	F	B	B	10.2	30.9	35.9
Lazaro Cárdenas	Eje 7 Sur	E	A	A	12.8	40.9	42.1
Lazaro Cárdenas	Eje 6 Sur	C	A	A	23.4	42.8	40.3
Lazaro Cárdenas	Eje 5 Sur	E	E	E	12.2	11.2	12.9
Lazaro Cárdenas	Cumbres de Maltrata	F	B	C	5.4	35	28.6
Lazaro Cárdenas	Eje 4 Sur	C	B	B	21.2	33.3	38.2
Lazaro Cárdenas	Av. Universidad	F	E	E	6.3	11.1	13
Lazaro Cárdenas	Obrero Mundial	F	F	F	8.3	9	9.8
Mier y Pesado	Eje 4 Sur	C	B	B	29.4	30.6	33.4
Mier y Pesado	Obrero Mundial	B	B	B	30.5	32.3	35.2
Obrero Mundial (E)	Gabriel Mancera	D	F	F	19.6	9.6	8.9
Obrero Mundial (E)	Sanchez Azcona	B	B	B	32.1	32.1	32.1
Obrero Mundial (E)	Eje 1 Poniente	C	C	C	26.9	26.6	26.6
Obrero Mundial (E)	Dr. Vertiz	C	A	B	27.4	39.7	34.4
Obrero Mundial (E)	Diag. De San Antonio	E	D	E	12.7	16.1	11.1
Obrero Munidal (W)	Lázaro Cárdenas	B	B	B	30	36.3	33.5
Obrero Munidal (W)	Dr. Vertiz	C	A	B	28.7	42	38.2
Obrero Munidal (W)	Eje 1 Poniente	C	A	B	29.3	41.5	29.7
Obrero Munidal (W)	Sanchez Azcona	A	A	A	43	43.9	43.9
Patriotismo	Eje 7 Sur	E	C	C	12.4	29.2	29.2
Patriotismo	Eje 6 Sur	C	A	A	23.5	43.7	43.7
Patriotismo	Eje 5 Sur	F	D	D	6.4	19.9	19.9
Rafael Donde	Eje 4 Sur	D	C	C	19.1	28.6	29.2
Revolución	Eje 7 Sur	A	A	A	44.6	49.3	49.3
Rio Mixcoac	Jose Maria Rico	D	E	E	19.2	11.8	11.8
Rio Mixcoac	Patriotismo	A	A	A	50	50.5	50
Xola	Av. Insurgentes	F	E	E	12.1	15.5	15.5
Xola	División del Norte	F	E	E	13.5	15.5	15.5
Xola	Av. Coyoacan	D	B	C	27.2	38.5	31.5

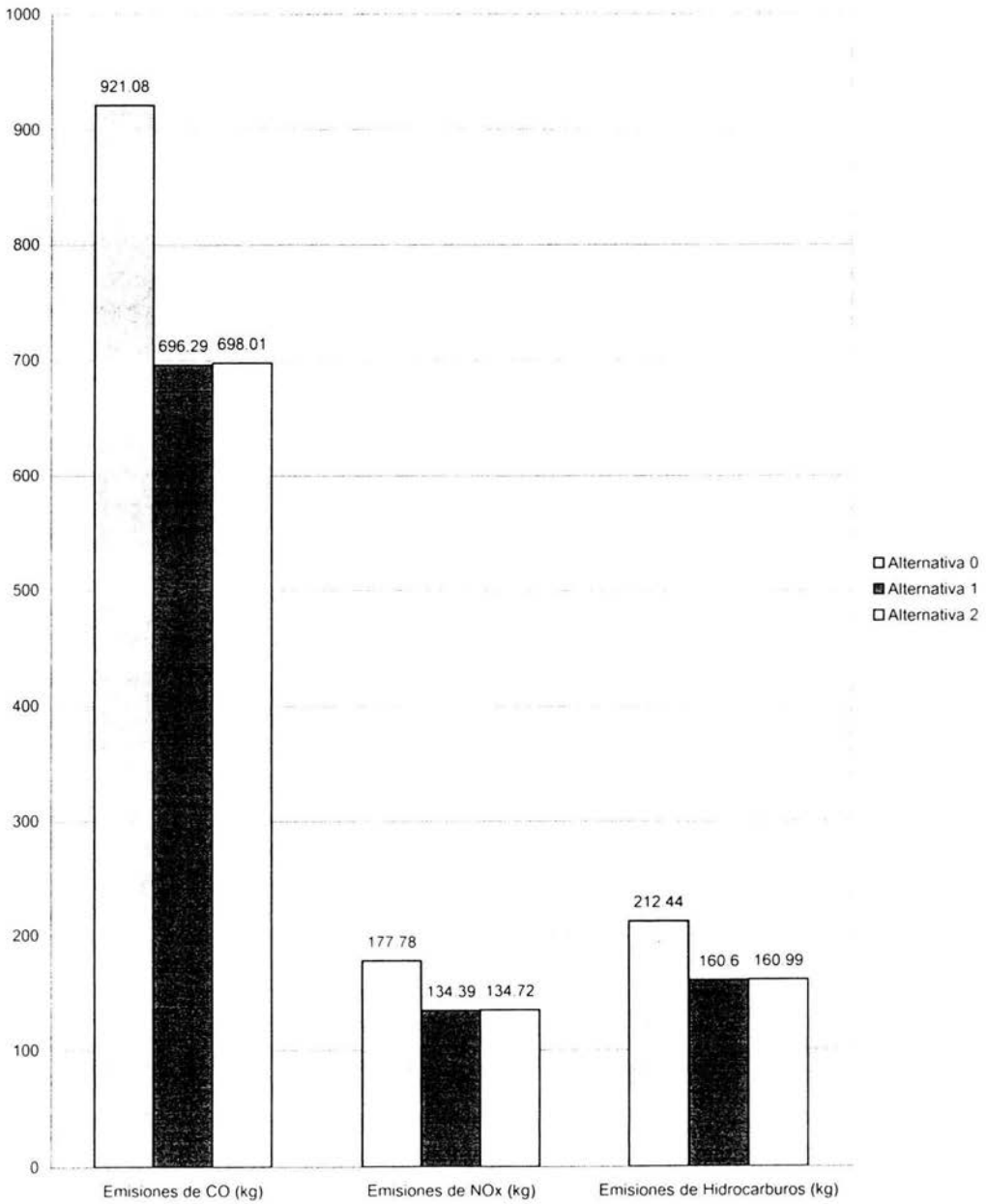
## ANEXO 6 - Comparación entre alternativas

Desempeño General de la Red

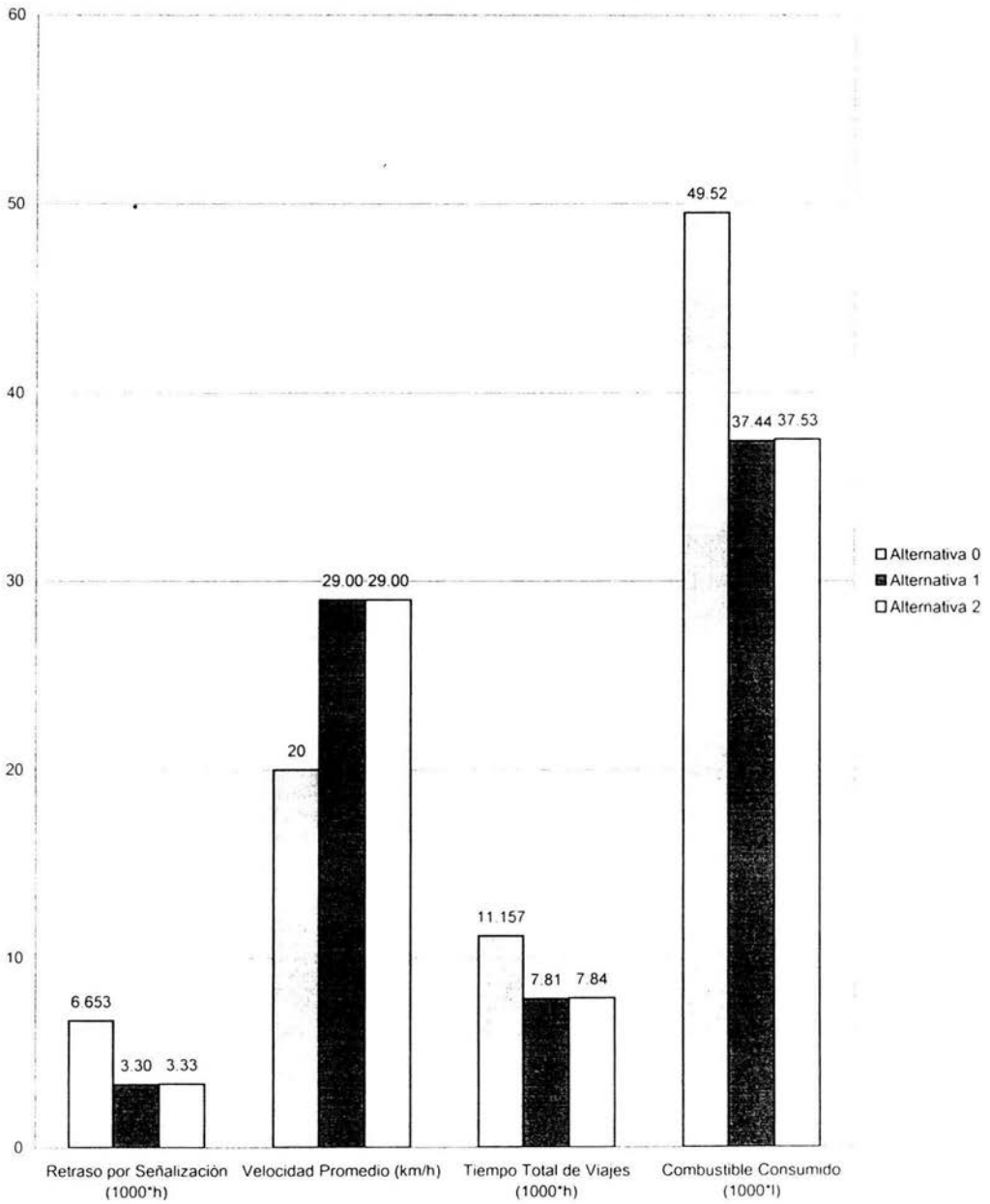
	Alternativa 0	Alternativa 1	Alternativa 2
Network Totals			
Number of Intersections	102	102	102
Total Percentile Signal Delay (hr)	6653	3302	3332
Stops / Veh	0.93	0.66	0.66
Stops	433024	307776	308244
Average Speed (km/hr)	20	29	29
Total Travel Time (hr)	11157	7807	7836
Distance Traveled (km)	225204	225204	225204
Fuel Consumed (l)	49520	37435	37527
Fuel Economy (km/l)	45	60	60
CO Emissions (kg)	921.08	696.29	698.01
NOx Emissions (kg)	177.78	134.39	134.72
VOC Emissions (kg)	212.44	160.6	160.99

Número de Intersecciones	102	102	102
Retraso por Señalización (1000*h)	6.653	3.302	3.332
Paros por vehículo	0.93	0.66	0.66
Paros totales	433024	307776	308244
Velocidad Promedio (km/h)	20	29	29
Tiempo Total de Viajes (1000*h)	11.157	7.807	7.836
Distancia de viajes (km)	225204	225204	225204
Combustible Consumido (1000*l)	49.52	37.435	37.527
Emisiones de CO (kg)	921.08	696.29	698.01
Emisiones de NOx (kg)	177.78	134.39	134.72
Emisiones de Hidrocarburos (kg)	212.44	160.6	160.99

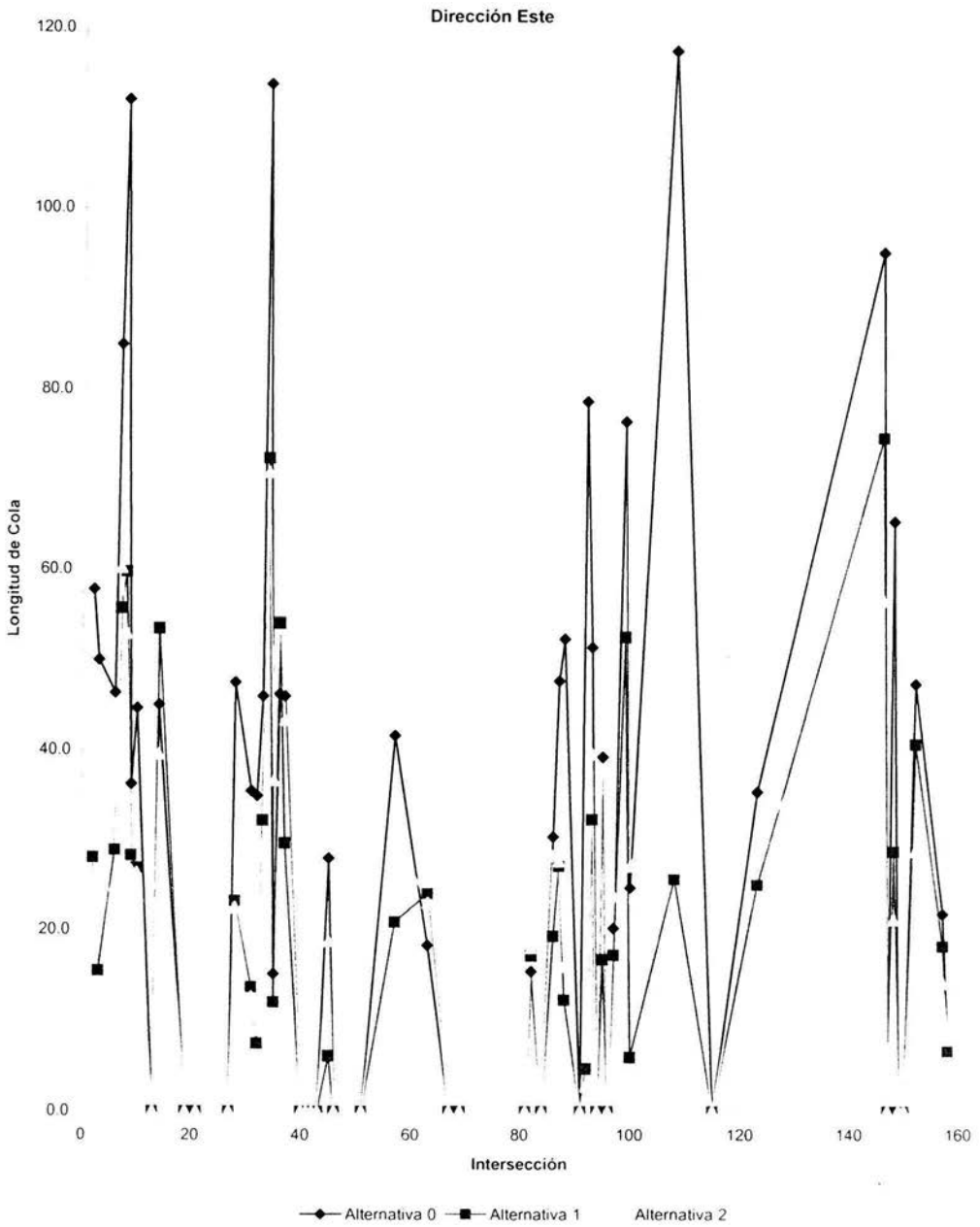
### Anexo 6 - Beneficio Ambiental



### Anexo 6 - Beneficio al Usuario

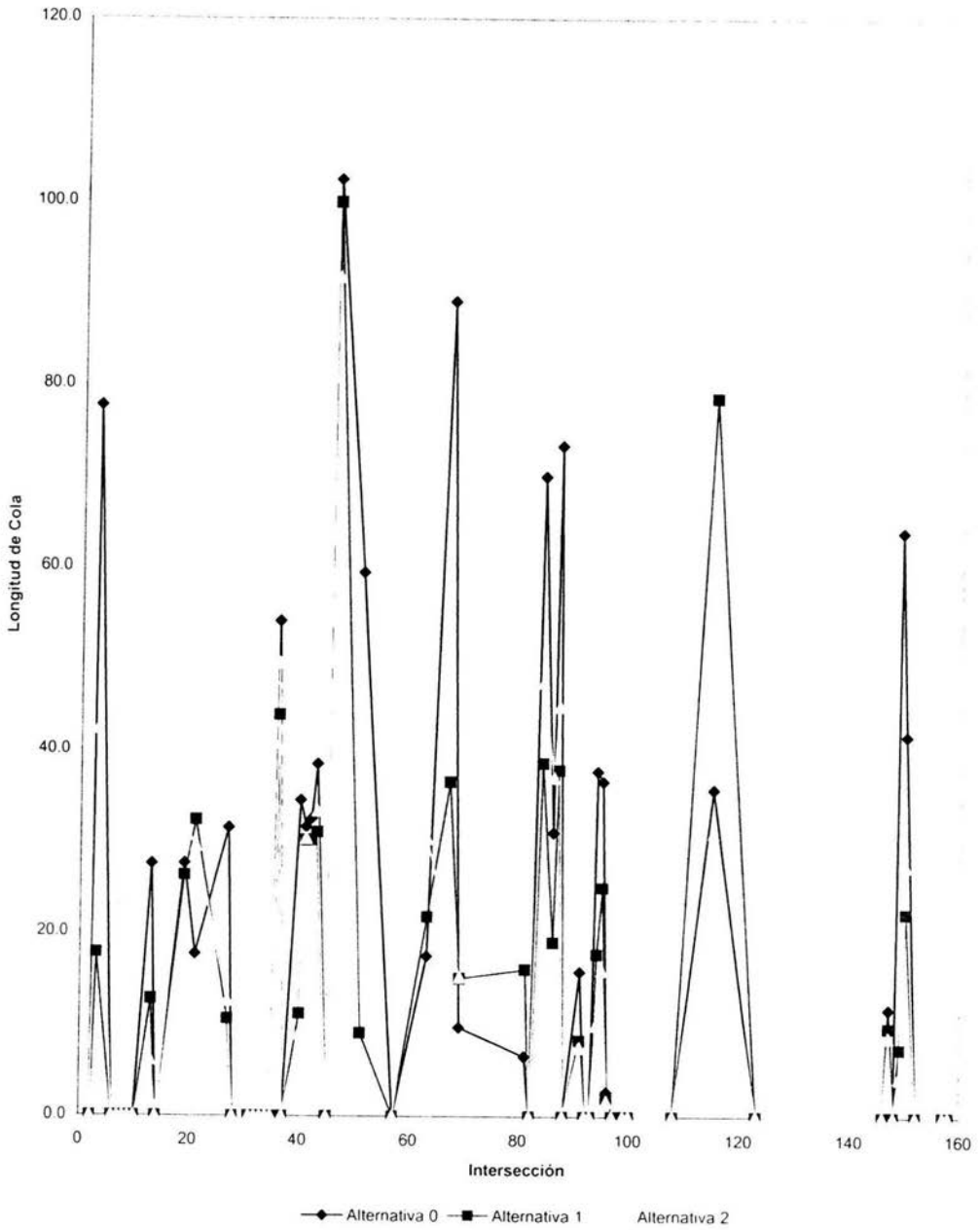


# Anexo 7 Graficas por dirección

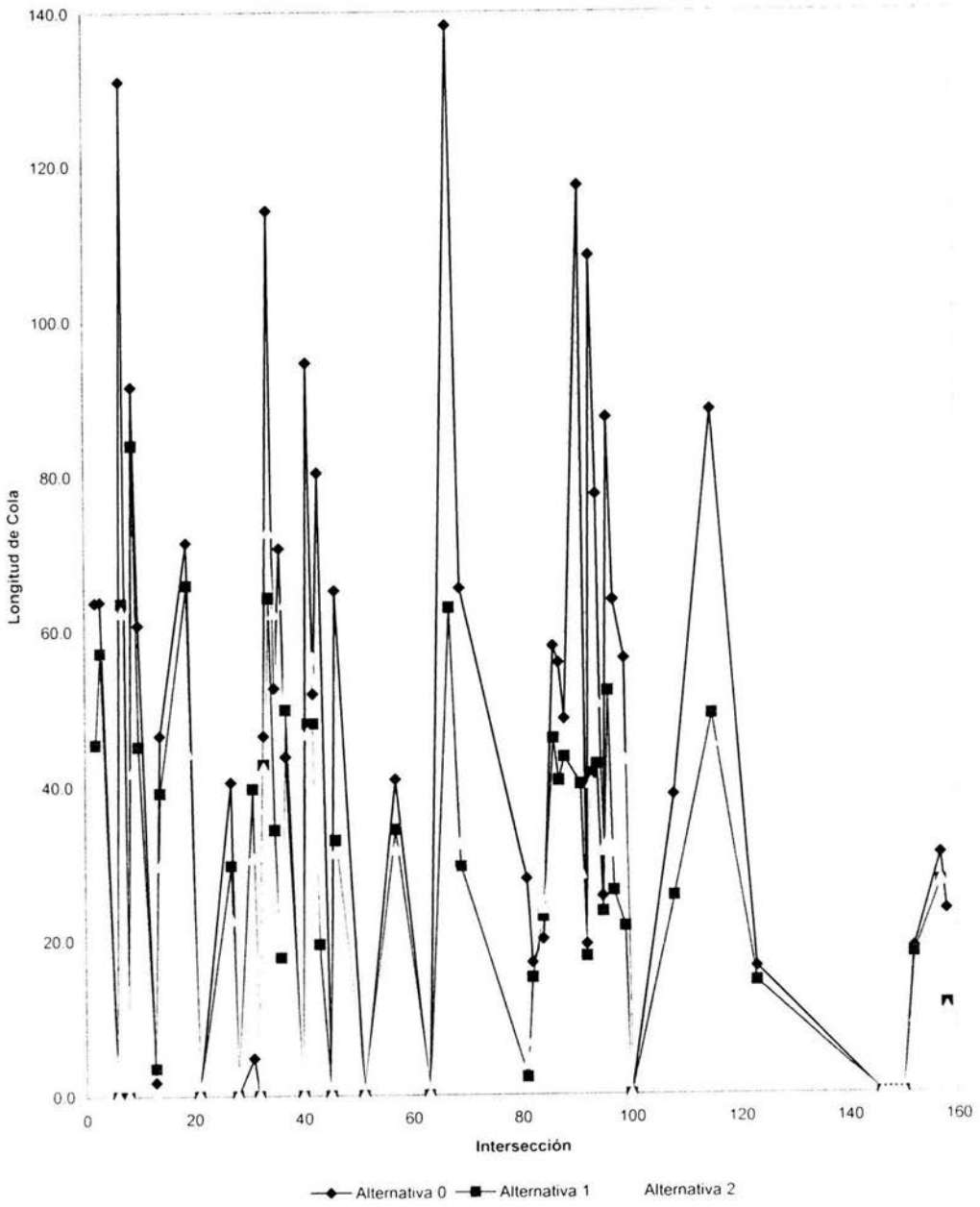




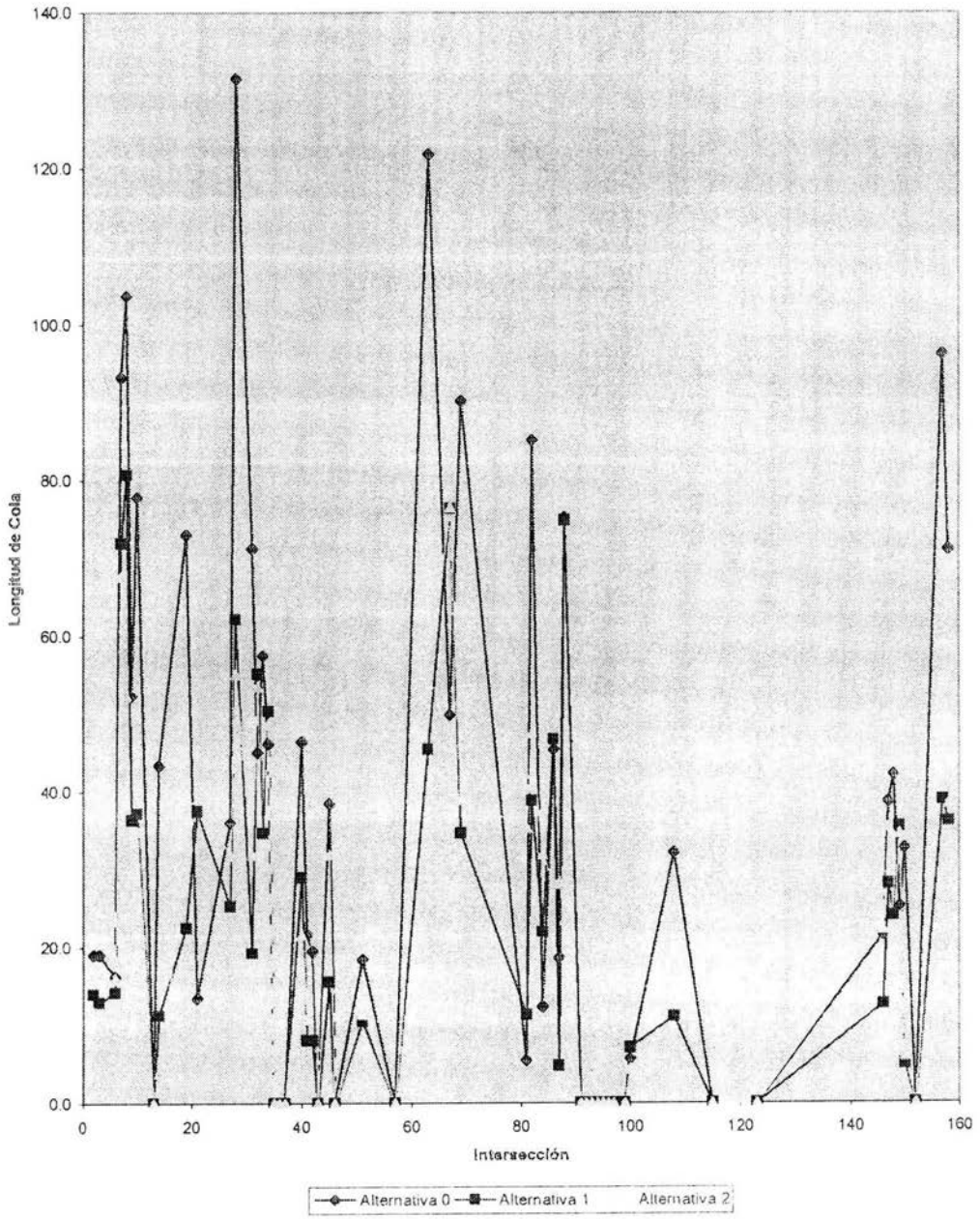
Dirección Oeste



Dirección Norte



Dirección Sur



## **Bibliografía**

Maricarmen González Videgaray, *Modelos y Simulación*, UNAM, México

Rafael Cal y Mayor, James Cárdenas, *Ingeniería de Tránsito Fundamentos y Aplicaciones*, Ed. Alfaomega, 7ma. Edición, 1995, México

Meyer, *Probabilidad y aplicaciones estadísticas*, Fondo Educativo Interamericano, 1era Edición, 1973, México

Gloria Londoño, Álvaro Restrepo, *Intercambio Vial de la Aguacatala calle 12 sur con carrera 48 de Medellín*, Universidad Nacional de Colombia, 1996, Colombia

Transportation Research Board, *Highway Capacity Manual*, National Research Council, Washington, 1995

Secretaría de Comunicaciones y Transportes, *Normas de Servicios Técnicos, Proyecto Geométrico, Carreteras*, México, 1984

INEGI

<http://www.inegi.gob.mx/inegi/default.asp>

DELEGACIÓN BENITO JUÁREZ

<http://www.delegacionbenitojuarez.gob.mx>

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD

<http://gulliver.trb.org>