



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA DE SISTEMAS - TRANSPORTE

USO DE LA SIMULACIÓN PARA MEJORAR LA MOVILIDAD VEHICULAR EN LOS
CRUCEROS DE CALZADA DE TLALPAN Y RENATO LEDUC CON LA LATERAL DE
PERIFÉRICO

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
ING. JOEL MAURICIO CORTÉS PATIÑO

TUTOR
DR. RICARDO ACEVES GARCÍA – FACULTAD DE INGENIERÍA

MÉXICO, D. F. ENERO 2016

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Sánchez Guerrero Gabriel D.
Secretario: Dr. Sánchez Lara Benito
1 er. Vocal: Dr. Aceves García Ricardo
2 do. Vocal: M.I. Rivera Colmenero José Antonio
3 er. Vocal: M.I. Guzmán Castro Luis Alejandro

Ciudad Universitaria, UNAM, México D.F.

TUTOR DE TESIS:

Dr. Ricardo Aceves García

FIRMA

AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitirme la vida y darme las fuerzas necesarias para siempre salir adelante.

A toda mi familia, que son base fundamental de cada paso en mi vida y la razón de todos mis esfuerzos.

A mis amigos de toda la vida, por su apoyo incondicional.

A mis compañeros y amigos de la maestría: Irene, Marisol, Enrique, Miguel, Sandra, Sergio, Norma, Reynaldo, Alfredo, Edgar, Simón; que aunque por breve tiempo, formaron parte de esta etapa satisfactoria.

Agradezco al jurado asignado: Dr. Gabriel Sánchez, Dr. Benito Sánchez, M.I. Antonio Colmenero y M. I. Alejandro Guzmán; por sus oportunos comentarios y recomendaciones al presente trabajo. Además por su dedicación y los conocimientos impartidos en las asignaturas del plan de estudios.

Quiero ofrecer un especial agradecimiento al **Dr. Ricardo Aceves García** por el apoyo brindado en la tutoría a lo largo de toda la maestría.

A la *Universidad Nacional Autónoma de México* por la oportunidad de continuar con los estudios de posgrado.

Finalmente agradezco al *Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología* (CONACyT), por el apoyo en la realización de este trabajo.

Contenido

INTRODUCCIÓN	6
1 CASO DE ESTUDIO	8
2 ASPECTOS TEÓRICOS Y METODOLÓGICOS	23
2.1 CONGESTIÓN	23
2.1.1 <i>Causas de la congestión</i>	24
2.1.2 <i>Consecuencias de la congestión</i>	30
2.2 INGENIERÍA DE TRÁNSITO	32
2.2.1 <i>Alcances de la ingeniería de tránsito</i>	33
2.2.2 <i>Tipos de solución</i>	34
2.2.3 <i>Metodología general para la solución de problemas de tránsito</i>	38
2.3 DISPOSITIVOS DE CONTROL DE TRÁNSITO EN INTERSECCIONES.....	39
2.3.1 <i>Intersecciones</i>	39
2.3.2 <i>Tipo de intersecciones</i>	40
2.3.3 <i>Dispositivos de control</i>	44
2.3.4 <i>Semáforos</i>	47
2.4 SIMULACIÓN	62
2.4.1 <i>Tipos de simulación</i>	63
2.4.2 <i>Ventajas y desventajas de la simulación</i>	64
2.4.3 <i>Etapas de la simulación</i>	65
2.4.4 <i>Simulación de tráfico</i>	66
3 ESTRATEGIA DE TRABAJO	68
3.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA Y DELIMITACIÓN DEL SISTEMA	68
3.2 COLECCIÓN DE DATOS Y FORMULACIÓN DEL MODELO	69
3.3 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO EN LA COMPUTADORA.....	83
4 RESULTADOS	88
4.1 ANÁLISIS DEL ESTADO ACTUAL DE LA ZONA DE ESTUDIO	88
4.2 ESCENARIOS PROPUESTOS	92
4.2.1 <i>Escenario 1</i>	92
4.2.2 <i>Escenario 2</i>	94
4.3.3 <i>Escenario 3</i>	95
5 CONCLUSIONES	99
REFERENCIAS	102
ANEXOS	106
ANEXO 1.....	106

ANEXO 2.....	118
ANEXO 3.....	122

Introducción

Debido a que el número de vehículos y las necesidades de transporte crecen a ritmo acelerado, la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) muestra serios problemas de congestión vehicular en su red de transporte y es un problema que seguirá agravándose, constituyendo un peligro para la calidad de la vida urbana (Bull, 2003).

Deficiencias en el diseño geométrico, la falta de conservación de las vialidades, el uso intensivo de automóviles particulares, el estilo de conducción de los ciudadanos, la defectuosa información sobre las condiciones del tránsito y la **inapropiada operación de los sistemas de control**, son algunas causas que fomentan la congestión vehicular (Bull, 2003).

Las principales consecuencias asociadas a este problema, incluyen (Bull, 2003):

- Reducción de las velocidades de circulación.
- Incremento de los tiempos de viaje, especialmente en las horas pico, que alcanza en algunas ciudades niveles bastante superiores a los considerados aceptables.
- La lentitud de desplazamiento exacerba los ánimos y fomenta el comportamiento agresivo de los conductores.
- Incremento de la contaminación ambiental.
- Ruido.
- Problemas de salud derivados de la contaminación.
- Acumulación de gases de efecto invernadero.

- Aumento de accidentes.
- Mayor consumo de combustibles y aumento en general de los costos operacionales de los vehículos.
- La congestión retarda el movimiento de mercancías y de servicios, de tal modo que, aumenta el precio de los productos y reduce la competitividad de los negocios.

Se calcula que la congestión y algunos de sus efectos como la emisión de gases de efecto invernadero, los accidentes y el ruido, generan costos económicos, en las principales zonas metropolitanas del país, de alrededor de 173 mil millones de pesos, es decir, un valor cercano al 4% del PIB de estas zonas (Medina, 2012).

A partir de esta información, el objetivo de la tesis es evaluar distintos escenarios de operación de los semáforos del caso de estudio, utilizando software especializado en tránsito, con el fin de mejorar la circulación de la zona y ayudar a reducir la congestión vehicular y mitigar algunos de sus efectos negativos.

Se expone a continuación el caso de estudio elegido para luego dar paso a los aspectos teóricos y metodológicos en el capítulo 2, en donde se analiza el problema de la congestión, los elementos principales involucrados en la operación de una intersección semaforizada, los conceptos fundamentales de la simulación. En el capítulo 3 se expone la estrategia de trabajo realizada, entre los cuales se describe la recolección de datos, la formulación del modelo de las intersecciones estudiadas, entre otros aspectos. En el capítulo 4, se discuten los resultados así como el análisis de los escenarios propuestos. Finalmente en el capítulo 5 se presentan las conclusiones del trabajo.

1

Caso de estudio

Sin duda la principal zona urbana del país, es la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM); en donde hace aproximadamente 50 años comenzó un periodo crecimiento que involucró un crecimiento de población de 2 millones 953 mil habitantes en 1950 (FIMEVIC, s/f) a 20 millones 843 mil habitantes en 2014 (Cisneros, 2014).

Este crecimiento fue acompañado de una fuerte concentración industrial, comercial y financiera que ha rebasado los límites administrativos y políticos de la Ciudad de México (principal entidad de la ZMVM).

Dicha expansión ha sobrepasado también la infraestructura física de la ciudad, particularmente las vialidades. En la actualidad la congestión y la saturación de las vialidades, entre otros factores, ha producido un aumento sustancial de los tiempos promedio de viajes. Se calcula que en 2007 el tiempo promedio de viaje de los habitantes del D.F. era de 53 minutos y que en 2009 aumentó a 1 hora 21 minutos (Tarriba y Alarcón, 2012), por mencionar tan solo un ejemplo.

Ahora bien, el Gobierno del Distrito Federal (GDF), reporta en el *Programa Integral de Movilidad 2013-2018* que la ciudad cuenta actualmente con una red vial total de 10,403.44 km de longitud, de la cual el 10.73% corresponde a vialidades primarias y el

89.27% pertenece a vialidades secundarias. Esta importante cantidad de vialidades representan entre el 25 y 30% del total del territorio urbano de las ciudades.

Este mismo documento, reporta que el 85% del espacio vial es utilizado por vehículos particulares y el 15% restante lo utiliza el transporte público. No obstante, los taxis ocupan dos terceras partes de este último, por lo que encontramos un uso ineficiente del espacio vial, ya que los vehículos ocupan quince veces más espacio que el transporte público, pero satisface solamente el 30% de los viajes (GDF, 2014).

Por su parte la Secretaria de Movilidad, SEMOVI (antes SETRAVI), reporta dentro de su página web, en la sección de *Estadísticas*, que dentro de la red, existe un alto número de intersecciones, las cuales:

- 3,076 son intersecciones semaforizadas.
- 1,810 son intersecciones con semáforos electrónicos.
- 1,246 son intersecciones con semáforos computarizados.
- 172 intersecciones cuentan con cámaras de video para observar el tránsito vehicular y los incidentes en la vía pública.
- Existen 20 tableros electrónicos.

La misma dependencia reporta en su documento: *Muestra de saturación en vialidades primarias en horas de mayor demanda*, que las horas de mayor saturación vehicular abarcan de 6:30 a 9:00 hrs., de 12:00 a 15:00 hrs., y de 18:30 a 21:30 hrs. En estos horarios también se suele presentar congestión vehicular, por ello se utiliza dicho documento para conocer las principales vialidades afectadas.

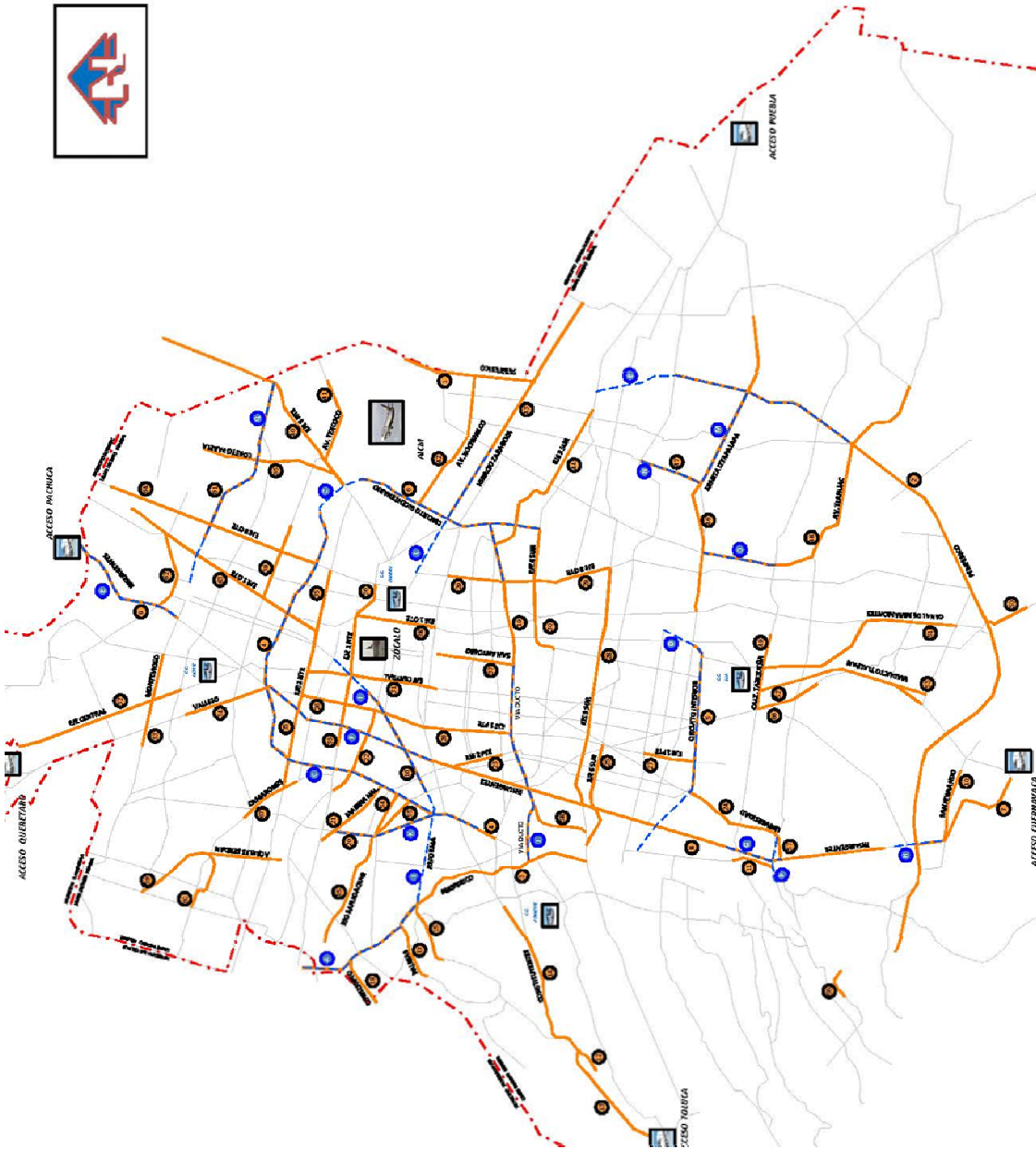


Figura 1.1 Saturación de vialidades en turno matutino. Fuente: SEMOVI

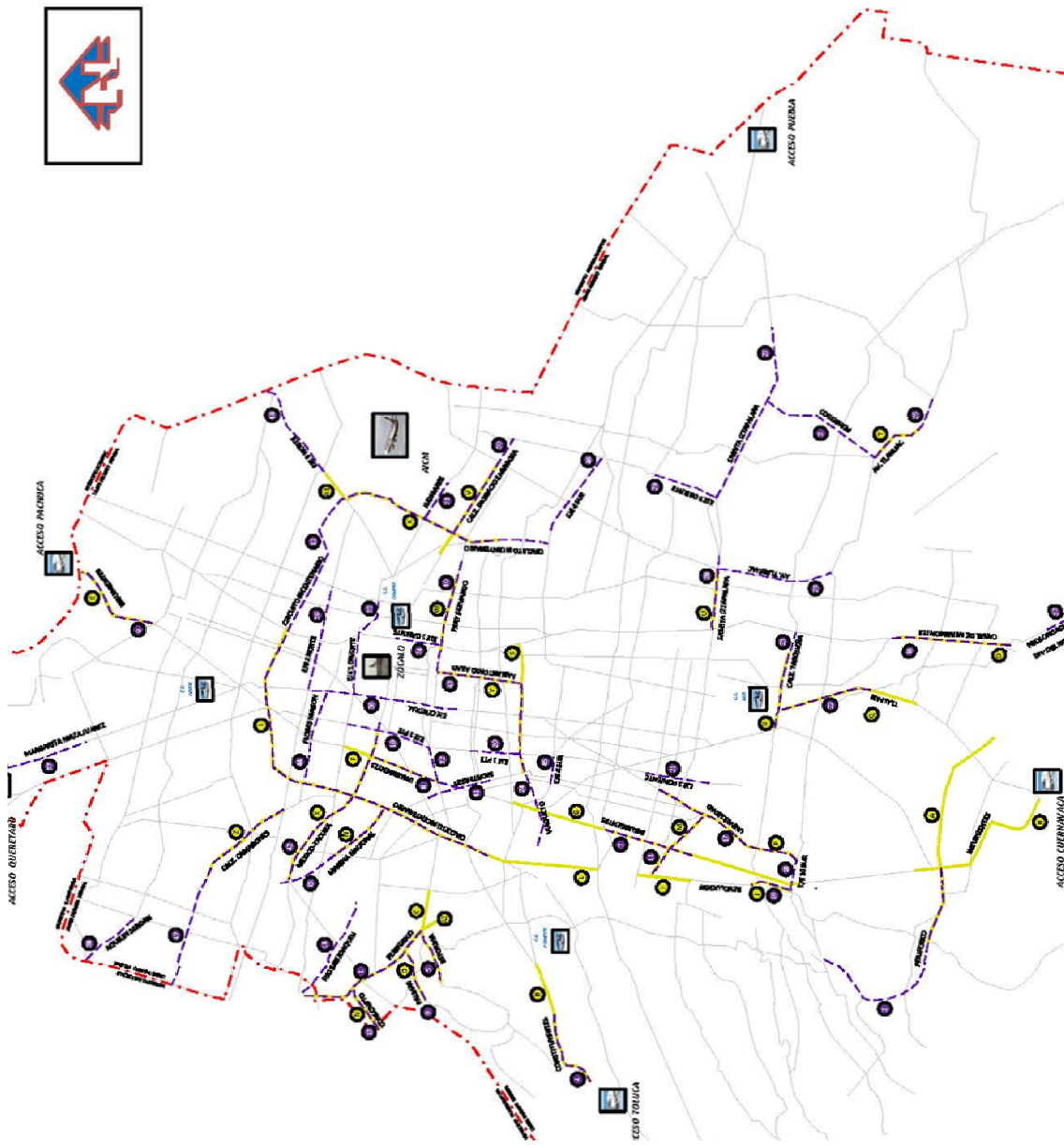


Figura 1.2 Saturación de vialidades en turno vespertino. Fuente: SEMOVI

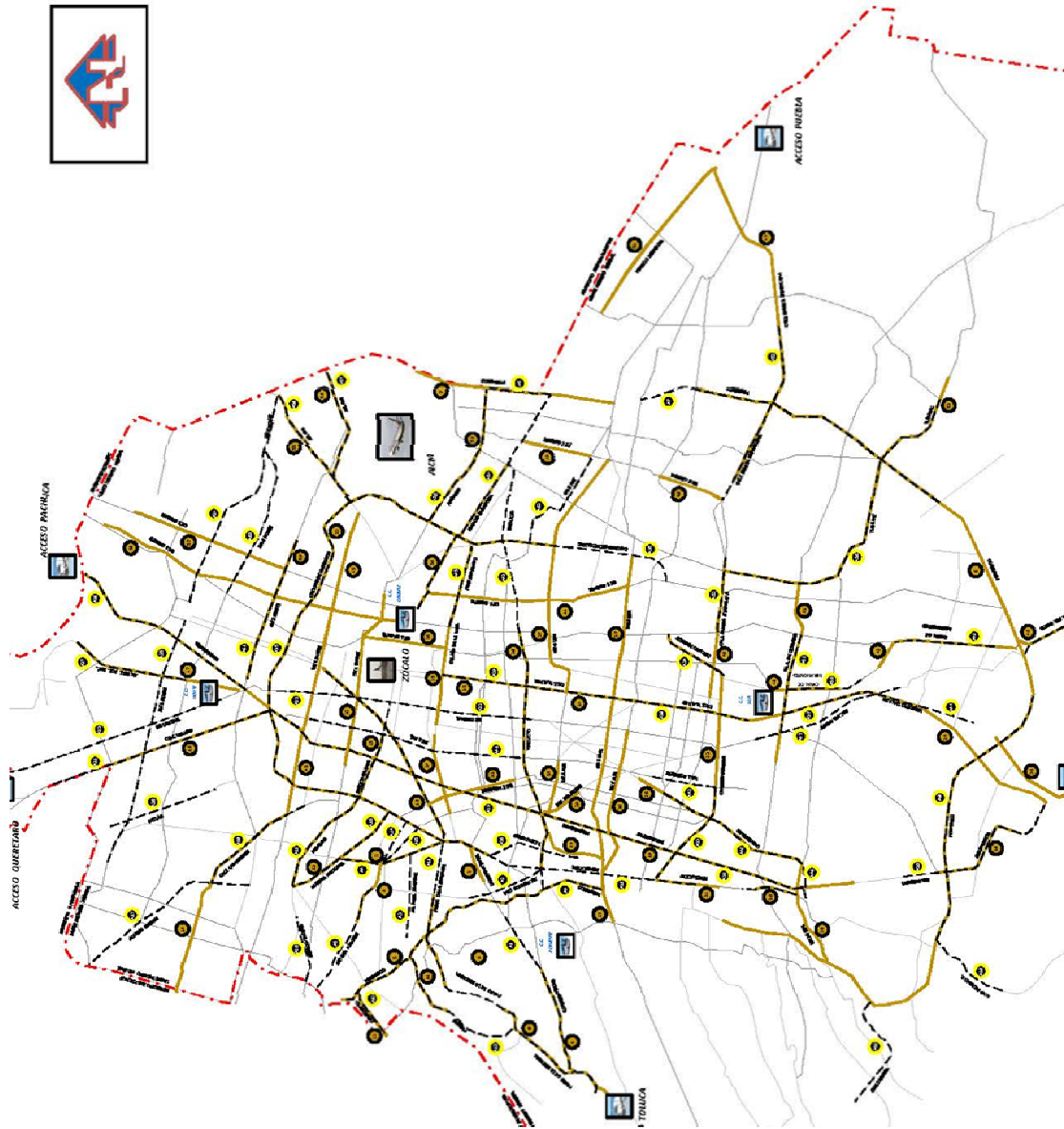


Figura 1.3 Saturación de vialidades en turno nocturno. Fuente: SEMOMI

Particularmente, en la zona sur de la Ciudad de México, encontramos vialidades con gran demanda vehicular y que en general presentan congestión. En el horario matutino encontramos las siguientes (*Figura 1.1*):

- Av. Prolongación División del Norte de Sur a Norte, de Paseo de los Cedros a Periférico.
- Viaducto Tlalpan de Sur a Norte, de Calzada Acoxpa a Tlalpan.
- Calzada de Tlalpan de Sur a Norte de Calzada Acoxpa a Calzada Taxqueña.
- Canal de Miramontes de Sur a Norte de Calzada Acoxpa a Taxqueña.
- Periférico de Oriente a Poniente, de Luis Méndez a Picacho Ajusco.
- Insurgentes. De Sur a Norte, de Tlalpan a Periférico.
- Av. San Fernando de Sur a Norte, de Fco. I. Madero a Insurgentes.

En el horario vespertino, las vialidades con mayor saturación son (*Figura 1.2*):

- Canal de Miramontes de Sur a Norte, de Calzada Acoxpa a Eje 2 Oriente.
- Prolongación División del Norte de Norte a Sur, de Tierra Libertad a Guadalupe y Ramírez.
- Periférico de Oriente a Poniente, de Viaducto Tlalpan a Picacho Ajusco.
- Insurgentes de Norte a Sur, de Llanura a Tlalpan.
- Tlalpan de Norte a Sur, de Taxqueña a Calzada del Hueso.

En el horario Nocturno tenemos las siguientes vialidades (*Figura 1.3*):

- Prolongación División del Norte de Norte a Sur de Periférico a Deportivo Xochimilco y de Sur a Norte de Guadalupe I. Ramírez a Periférico.
- Canal de Miramontes de Sur a Norte de Av. Troje a Eje 2 Oriente y de Norte a Sur de Estrella Binaria a Periférico.
- Viaducto Tlalpan de Norte a Sur de Viaducto Miguel Alemán a Insurgentes y de Sur a Norte de Juan Bosco a Calzada de Tlalpan.
- Periférico de Oriente a Poniente de Calzada México Xochimilco a Picacho Ajusco y de Poniente a Oriente de Calzada Desierto de los Leones a Luis Méndez.

Como vemos, hay diversas intersecciones con problemas de saturación y congestión, no obstante, es necesario delimitar el área de estudio para poder demostrar que mediante la optimización de los tiempos de semáforo, se pueden mitigar (en cierta medida) la congestión y algunos de sus efectos. Por esta razón se definió como caso de estudio la zona delimitada por los cruces entre las laterales de Periférico con

Calzada de Tlalpan y con Renato Leduc; y el cruce de Renato Leduc con la Calzada de Tlalpan (*Figura 1.4*).

Además, se eligió esta zona como caso de estudio debido a que presentan serios problemas de congestión en los horarios matutino, vespertino y nocturno. Además, debido a la cercanía en que se encuentra y al conocimiento personal de la zona, se determinó que era adecuado elegir dichas intersecciones.

Ahora bien, en la *Figura 1.5* y *1.6* se observa el tráfico que se dirige hacia el Poniente sobre la lateral de Periférico cruce con Calzada de Tlalpan. Para fines prácticos, la denominaremos como **Intersección 1**. En este punto se registran filas de autos desde los 480 metros hasta los 900 metros de longitud en horas pico. Sobre la misma lateral de Periférico, pero en dirección opuesta, las cola llega a ser de aproximadamente de 220 metros.

En esta misma intersección, sobre Calzada de Tlalpan, las colas llegan a tener una longitud de hasta 230 metros en ambas direcciones.

En las *Figuras 1.7* y *1.8* se muestran la configuración de la intersección y la ubicación de los semáforos en este cruce.

Por otro lado, en la intersección de la lateral de Periférico y Renato Leduc, la principal cola se presenta en el flujo de vehículos que se dirige hacia el Oriente sobre la lateral de Periférico, cuya magnitud llega a ser de hasta 470 metros (*Figura 1.9*). Por su parte, sobre Renato Leduc la cola llega a ser de hasta 250 metros (*Figura 1.10* y *1.11*). Esta intersección se denominará **Intersección 2**.

En las *Figuras 1.12* y *1.13* se presenta la configuración de la intersección, los flujos y ubicación de semáforos.

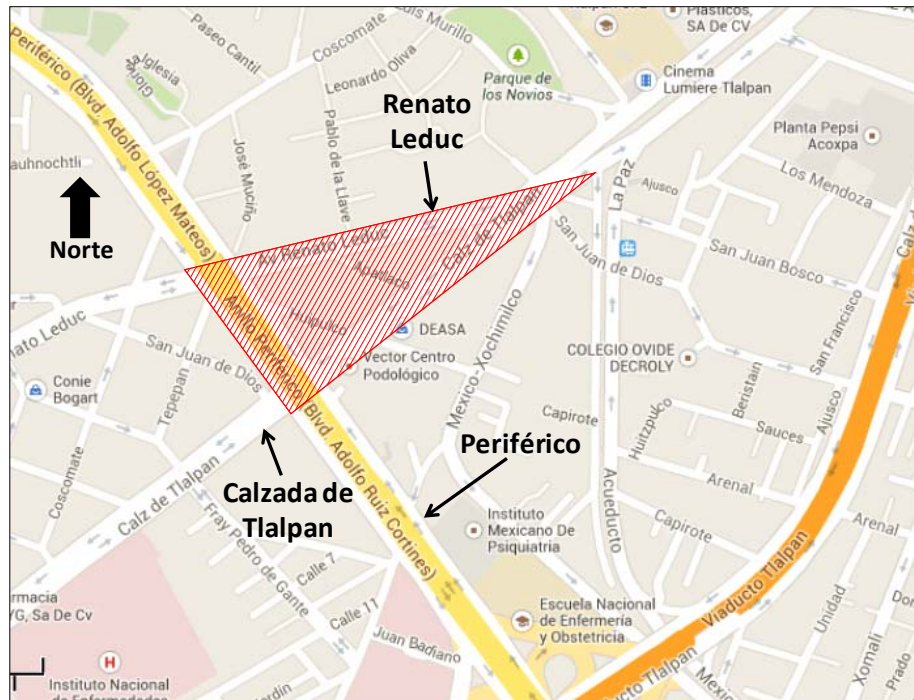


Figura 1.4 Ubicación de las intersecciones.

Fuente: Elaboración propia basada en imagen extraída de Google Maps (2015).



Figura 1.5 Lateral de Periférico y Calzada de Tlalpan.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 1.6 Lateral de Periférico y Calzada de Tlalpan
Fuente: Elaboración propia.



Figura 1.7 Sentido de las vías – Intersección 1
Fuente: Elaboración propia basada en imagen extraída de Google Maps (2015).



Figura 1.8 Ubicación de semáforos – Intersección 1
Fuente: Elaboración propia basada en imagen extraída de Google Maps (2015).



Figura 1.9 Lateral de Periférico
Fuente: Elaboración propia.



*Figura 1.10 Lateral de Periférico y Renato Leduc
Fuente: Elaboración propia.*



*Figura 1.11 Lateral de Periférico y Renato Leduc
Fuente: Elaboración propia.*

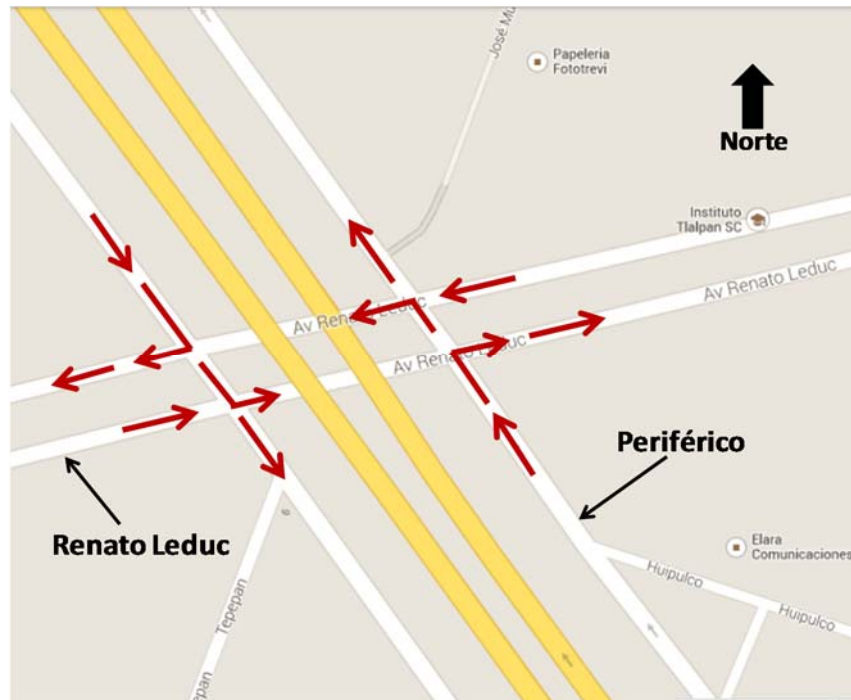


Figura 1.12 Sentido de las vías – Intersección 2

Fuente: Elaboración propia basada en imagen extraída de Google Maps (2015).

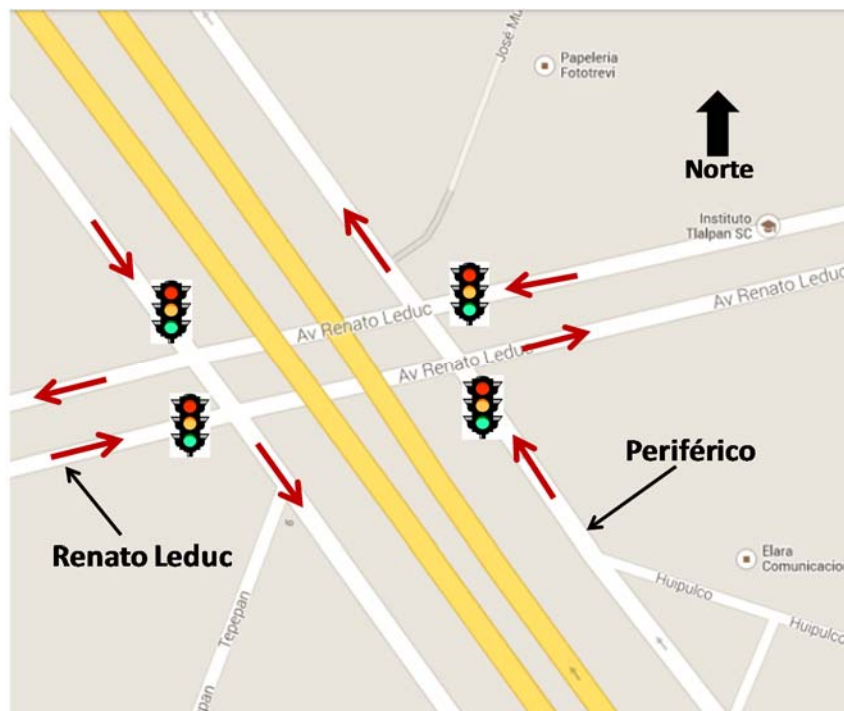


Figura 1.13 Ubicación de semáforos – Intersección 2

Fuente: Elaboración propia basada en imagen extraída de Google Maps (2015).

Finalmente en la intersección de Renato Leduc y Calzada de Tlalpan, se presenta una cola que llega a ser de hasta 1 kilómetro sobre Calzada de Tlalpan, a partir de la intersección con Renato Leduc hasta el Estadio Azteca. (Figura 1.14). La situación se agrava en la intersección de Renato Leduc, Calzada de Tlalpan y Calzada México Xochimilco debido al cruce de los flujos vehiculares. (Figura 1.15 y 1.16). En las Figuras 1.17 y 1.18 se presenta la configuración de la intersección, los flujos y ubicación de semáforos. Esta intersección se denominará **Intersección 3** para fines prácticos.



Figura 1.14 Calzada de Tlalpan Fuente: Elaboración propia.



Figura 1.15 Calzada de Tlalpan y Renato Leduc Fuente: Elaboración propia.



Figura 1.16 Calzada de Tlalpan y Renato Leduc Fuente: Elaboración propia.



Figura 1.17 Sentido de las vías – Intersección 3 Fuente: Elaboración propia basada en imagen extraída de Google Maps (2015).



Figura 1.18 Ubicación de semáforos – Intersección 3

Fuente: Elaboración propia basada en imagen extraída de Google Maps (2015).

Como se ha hecho mención, en estas vialidades existe una gran demanda vehicular en los tres periodos de tiempo (matutino, vespertino y nocturno). Encontramos además, que los sistemas semafóricos que controlan las intersecciones del caso de estudio expuesto (y en la mayoría de las intersecciones de la ciudad), son sistemas estáticos, es decir, los tiempos de semáforo no varían de acuerdo a la hora del día o de acuerdo a los cambios de los flujos vehiculares.

Se hace visible entonces, la necesidad de revisar las condiciones actuales de operación de los semáforos para determinar si requieren ser optimizados y proponer escenarios de operación para mejorar la circulación de la zona.

Para ello en el siguiente capítulo se sientan las bases teóricas necesarias para realizar dicha tarea y para formular la estrategia de trabajo.

2

Aspectos teóricos y

Metodológicos

2.1 Congestión

En el estudio de los sistemas de transporte, la congestión es originada debido a la fricción o interferencia entre los vehículos que circulan en un mismo flujo de tránsito. Sucede que hasta un cierto nivel de flujo vehicular, los vehículos pueden circular a velocidad libre; y cuando los volúmenes de tránsito se incrementan, la adición de cada vehículo dificulta el movimiento de los demás, es ahí donde se dice que comienza la congestión vehicular.

Thompson y Bull (2002), definen de manera formal la congestión como: “La condición que prevalece si la introducción de un vehículo en un flujo de tránsito aumenta el tiempo de circulación de los demás”. Por otro lado, Ortuzar y Willumsen (1994), consideran que la congestión surge cuando la demanda de transporte se acerca a la capacidad de la infraestructura instalada y debido a ello, el tiempo de tránsito aumenta a un valor mucho

mayor que cuando se presentan condiciones de baja demanda vehicular tal lo ilustra la *Figura 2.1*, donde apreciamos que la avenida ha llegado a su máxima capacidad.



Figura 2.1 Avenida llegando a su máxima capacidad

Fuente: Portal El poder del consumidor

2.1.1 Causas de la congestión

En las definiciones anteriores se vislumbran los principales factores que participan en la generación de la congestión en las ciudades. Es importante reconocer estos agentes puesto que al atender a cada uno de ellos, es posible mitigar, en cierta medida, sus efectos nocivos.

Dentro de las principales causas de la congestión podemos mencionar los siguientes (Thompson y Bull, 2002):

- a) La configuración física de las vialidades:

La inadecuada planeación preliminar de vías e intersecciones genera sin duda congestión. Aunado a esto, la falta de delimitación de los carriles, cambios en el número de carriles, el establecimiento incorrecto de paraderos en avenidas importantes, tal como se muestra en la *Figura 2.2*, provocan que el flujo de tránsito se vea afectado seriamente.



Figura 2.2 Paradero generando problemas de tráfico

Fuente: Portal Ciudadanos en Red

b) La condición física de las vialidades:

La falta de mantenimiento de calles y avenidas provoca la generación de baches, charcos y hundimientos, los cuales hacen que los conductores se vean obligados a bajar las velocidades y por lo tanto se generan pérdidas de tiempo en los traslados, acumulación de tráfico, descomposturas y accidentes viales.



Figura 2.3 Falta de mantenimiento en vialidades

Fuente: El Universal

c) Los vehículos automotores:

Dentro de las opciones de transporte que se presentan en las ciudades, los vehículos particulares son los que hacen mayor uso del espacio vial considerando la cantidad de

pasajeros que transporta, como se observa en la *Figura 2.4*. Y es que en este sentido se puede decir, que en la mayoría de los casos, un automóvil particular genera mucha más congestión que, por ejemplo, un autobús, esto debido a que los primeros transportan en promedio a 1.5 personas mientras que los autobuses pueden transportar hasta 40 ó 50 pasajeros.

Aunado a esto, en países de América Latina el automóvil es sinónimo de estatus social, por lo que la cantidad de automóviles circulando ha aumentado con ritmos alarmantes en las últimas décadas.



Figura 2.4 Vehículos ayudan a generar congestión

Fuente: MX Noticias

d) Las prácticas de conducción:

La falta de educación vial y la falta de respeto por quienes comparten el sistema de vialidades en una ciudad pueden obstaculizar el tránsito fluido y generar congestión como puede verse en la *Figura 2.5*, que muestra un automóvil utilizando el carril dedicado a las bicicletas.

d) Información del viajero

El desconocimiento de las condiciones de tránsito y de las rutas disponibles de viaje, ocasiona que no siempre se elija la mejor alternativa que proporcione más beneficios a los usuarios del sistema tal como se ilustra en la *Figura 2.6*, donde se muestra que en esta división de la vialidad, no existe ningún tipo de señalamiento que permita al conductor anticipar su salida o desvió.



Figura 2.5 Invasión de carriles exclusivos
Fuente: Urban 360



Figura 2.6 Falta de señalización en la Ciudad de México
Fuente: Google Maps, Street View (2015)

e) Operación deficiente de los sistemas de transporte:

Aunque se ha mencionado que los automóviles particulares generan mayor congestión, con frecuencia sucede que la falta de regulación en los sistemas de transporte públicos provoque el aumento excesivo de las unidades de autobuses, taxis, etc., que también contribuyen al deterioro del orden y creación de malas prácticas operativas.

Esta desregularización también promueve la presencia de demasiados modos de transporte, los cuales generan atrasos en el flujo vehicular, debido a las diferentes velocidades que cada modo de transporte puede lograr desarrollar. Añadiendo al problema el hecho de que taxistas o microbuseros establecen bases o paraderos donde no fueron planeados originalmente tal como se muestra en la *Figura 2.7*.

e) Problemas institucionales:

Estos sucesos que ocurren en el transporte urbano son consecuencia directa de los problemas institucionales que existen entre los diversos entes que manejan al transporte urbano e inclusive interurbano.

En la Zona Metropolitana del Valle de México, por ejemplo, existen una multitud de agentes participantes en la planificación y administración del transporte urbano e interurbano, en quienes no existen vínculos o sistemas de información que promuevan la toma de decisiones óptimas en beneficio de la sociedad en general. Más bien cada ente hace lo que considera más adecuado sin tomar en cuenta las repercusiones sobre los intereses de los demás actores involucrados.

f) Dispositivos de control:

El establecimiento inadecuado de semáforos y de señalizaciones afecta el libre movimiento de los vehículos en las intersecciones de la red vial. Aún cuando se establezcan dispositivos de control bien ubicados, la deficiente operación de los sistemas de semáforos, conduce a desequilibrios en los tiempos de espera en estas zonas particulares ó como se muestra en la *Figura 2.8*, la falta de mantenimiento afecta el funcionamiento de las intersecciones de la Ciudad de México.



Figura 2.7 Falta de regularización del transporte público
Fuente: SDP Noticias



Figura 2.8 Falta de mantenimiento de semáforos
Fuente: Nicolás Corte, Publimetro.

Todos los elementos mencionados anteriormente, disminuyen la capacidad de la infraestructura vial y generan costos sociales y ambientales que se tratarán de forma general a continuación.

2.1.2 Consecuencias de la congestión

Antes de mencionar las consecuencias que causa la congestión en las ciudades, es importante resaltar que una de las características de este problema es el hecho que los costos sociales que genera, no son percibidos por los usuarios que la generan, es decir, el conductor solo percibe sus propias pérdidas y ganancias de acuerdo a sus decisiones tomadas (qué ruta utilizar, qué modo de transporte a utilizar, hora de viaje, etc.) y no logra percibir las afectaciones que genera a los demás por la toma de sus decisiones. Como resultado de este fenómeno, los usuarios tienden a sobreexplotar la vialidad en zonas y horas específicas (Bull, 2003).

Debido a esto las principales consecuencia de la congestión son (Bull, 2003):

a) Incremento de los tiempos de viaje:

Se puede decir que es la consecuencia más evidente que experimentan los ciudadanos, principalmente en las horas punta. En urbes como la Ciudad de México, las pérdidas de tiempo llegan a ser hasta de 3 horas diarias (CNNExpansion, 2011).

Estudios indican que en la ZMVM se pierden cerca de 33 mil millones de pesos anuales debidos a problemas de movilidad (El Universal, 2013), cifra que es de seria consideración y el constante aumento de los tiempos de viaje complican más esta situación.

Un efecto colateral del incremento de los tiempos de viaje, es la alteración de la conducta de los usuarios, ya que exacerba los ánimos y fomenta el comportamiento agresivo entre los usuarios.

b) Contaminación ambiental:

El aumento de las tasas de motorización, el incremento de los viajes realizados, están relacionados directamente con el aumento de la emisión de gases de efecto invernadero los cuales no solamente afectan de manera local sino globalmente, convirtiéndolo en uno de los grandes detonadores del cambio climático actual.

c) Afectaciones a la salud:

Al aumentar la contaminación principalmente del aire debido a la emisión de gases, se afecta directamente la salud de la población. Principalmente se observan problemas pulmonares y enfermedades respiratorias que cobran la vida de miles de personas al año a nivel mundial.

d) Mayor cantidad de accidentes:

La acumulación excesiva de diferentes modos de transporte en ciertos puntos de las vialidades como son las intersecciones, eleva considerablemente el riesgo de accidentes y atropellamientos.

e) Aumento del consumo de combustibles:

La dificultad de mantener velocidades constantes y la variabilidad de la misma en donde se presenta la congestión vehicular, genera el aumento del combustible, provocando así mayor contaminación del aire y la pérdida de este recurso no renovable.

f) Aumento de los costos de operación de los vehículos:

Tanto usuarios de vehículos particulares como conductores de transporte de carga o de transporte público, tienen que asumir el aumento de los costos que supone el aumento de los tiempos de traslado, el aumento del consumo de combustible e inclusive los costos de los seguros en caso de accidente, es decir de los costos de operación.

g) Perjuicios a la competitividad:

La vida económica de la ciudad se ve seriamente afectada debido a la congestión puesto que impone sobrecostos en la operación de los vehículos, sobre todo en el mundo actual donde existen clientes cada vez más exigentes y en donde se requiere de empresas y ciudades competitivas a nivel nacional e internacional.

Sin duda la inversión nacional o extranjera puede verse comprometida en aquellas urbes donde el nivel de congestión en sus vías principales sea alto e inclusive puede generar la desaparición o traslado a otros lugares o países de empresas debido al aumento desmedido de los tiempos de viaje, los niveles de contaminación y los accidentes vehiculares.

h) Pérdida de calidad de vida:

Las consecuencias antes mencionadas desembocan en el deterioro de la calidad de vida de los habitantes.

Se puede concluir entonces, que la pérdida de tiempo en el tránsito, los problemas de salud y la falta de trabajo debido a la perdida de inversiones, hacen que sean insostenibles los estilos de vida de la ciudad y que genera a su vez el desplazamiento de los ciudadanos a otros sitios o a las afueras de la ciudad, lo cual a su vez genera aún más congestión, ahora en los límites de la ciudad.

2.2 Ingeniería de tránsito

A fin de hacer frente a la congestión vehicular y proponer acciones eficaces y concretas, es necesario recurrir a la ingeniería de tránsito, la cual es parte de la ingeniería de transporte tal como lo ilustra la *Figura 2.9*, donde observamos varias áreas de acción de la ingeniería de transporte.

La Ingeniería de Transporte, en primer lugar, surge a partir de la necesidad de unir las distintas actividades que la sociedad realiza, y que se llevan a cabo en lugares separados (orígenes y destinos), en busca de una utilidad o beneficio, mediante el transporte de personas y bienes sobre diversos medios de comunicación. El éxito en satisfacer esta necesidad es contribuir a mejorar el nivel de vida de las sociedades de todos los países del mundo (Cal y Cárdenas, 1994).

A partir de esta necesidad se ha comprobado que cualquier área urbana o rural que desee crecer y prosperar o en su defecto mantener los niveles de servicio y detener el deterioro ambiental, requiere planear, estudiar, proyectar, construir, operar, conservar y administrar los sistemas de transportes existentes y futuros. Estos sistemas, al igual que los recursos existentes, deberán ser manejados de tal manera que se produzca el máximo flujo libre de tránsito (Cal y Cárdenas, 1994).

De esta forma, quedan claros los objetivos de la ingeniería de transporte y como se ha mencionado, la ingeniería de tránsito se desprende de ésta disciplina para atender específicamente el último objetivo de mantener los máximos flujos de vehiculares por el sistema de vialidades.

Para hacer una mayor distinción entre ambos términos, podemos definirlos de la siguiente forma (Cal y Cárdenas, 1994):

- **Ingeniería de Transporte:** Aplicación de los principios tecnológicos y científicos a la planeación, al proyecto funcional, a la operación y a la administración de las diversas partes de cualquier modo de transporte, con el fin de proveer la movilización de personas y mercancías de manera segura, rápida, comfortable, conveniente, económica y compatible con el medio ambiente.
- **Ingeniería de Tránsito:** Fase de la Ingeniería de Transporte relacionada con la planeación, el proyecto geométrico (proceso de correlación entre los elementos físicos de la vía y las características operativas de los vehículos) y la operación

del tránsito por calles y carreteras, sus redes, terminales, terrenos adyacentes y su relación con otros modos de transporte.

Queda claro entonces que la Ingeniería de Tránsito tiene propósitos específicos y por lo tanto tiene ciertos alcances que delimitan su área de aplicación dentro de los sistemas de transporte.

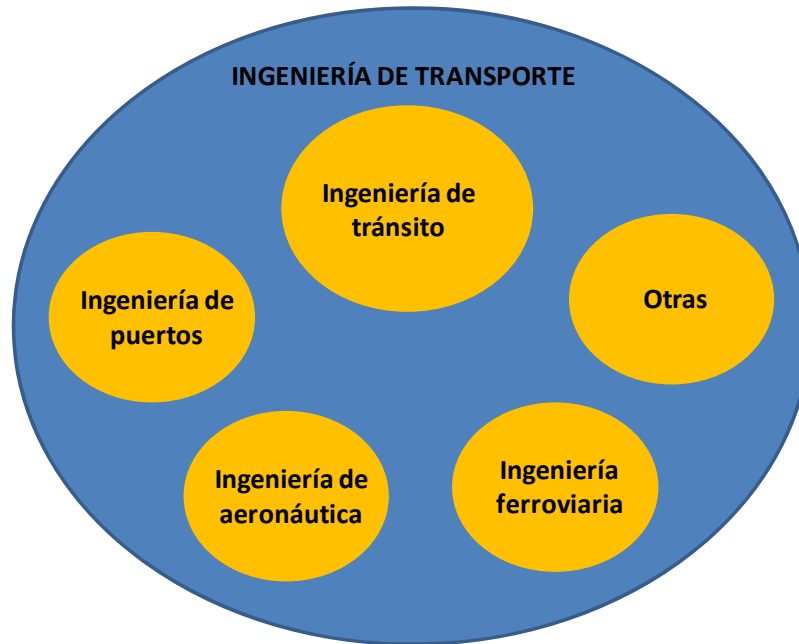


Figura 2.9 Áreas de la Ingeniería de Transporte
Fuente: Elaboración propia basada en definición de Cal y Mayor

2.2.1 Alcances de la ingeniería de tránsito

Se pueden mencionar cinco áreas principales contempladas dentro de las competencias de la ingeniería de tránsito en los sistemas de transporte, las cuales son (Cal y Cárdenas, 1994):

1) Caracterización del tránsito y de las vías: En este caso la ingeniería de tránsito se encarga de estudiar e investigar el comportamiento de los flujos vehiculares de acuerdo a su velocidad, los orígenes y destinos, así como el volumen de los viajes realizados. También analiza la capacidad de las vialidades y el funcionamiento de los diferentes elementos que encontramos en las ciudades como pasos a desnivel, intersecciones, terminales, etc. El usuario también es analizado desde la perspectiva de

sus capacidades y limitaciones para realizar frenado de emergencia, para realizar maniobras, su resistencia al cansancio, etc. Finalmente se incluyen en este apartado los accidentes viales y otros eventos no recurrentes.

2) Reglamento de tránsito: La ingeniería de tránsito ayuda a establecer las bases para los reglamentos de tránsito, en lo que se refiere a los derechos y obligaciones que deben tener los conductores, comportamiento en los diferentes tipos de vialidades (primarias, secundarias), así como los tipos de vehículos que son adecuados para una buena circulación vial. También ayuda a establecer las sanciones correspondientes y los procedimientos adecuados que las autoridades deben seguir a fin de fomentar el respeto vial.

3) Señalamientos y dispositivos de control: Es menester de esta disciplina, determinar los proyectos de construcción y conservación de señales, dispositivos de control, así como de la correcta iluminación necesaria en los sistemas viales. Corresponde así mismo señalar y promover el empleo de estos dispositivos y analizar su eficiencia.

4) Planificación vial: Este aspecto refiere al desarrollo de las vialidades adecuadas de un área específica, partiendo de las necesidades de la población en cuestión y de acuerdo a la visión de desarrollo que se tenga contemplada para dicha área. Es importante recalcar que esta planificación requiere de seria investigación a fin de conocer los problemas presentes y futuros que se puedan presentar, como el aumento de vehículos, el consecuente aumento de la demanda, las tendencias de crecimiento, etc. Esto último quiere decir que el Ingeniero en Tránsito debe ser seriamente considerado en la planificación urbana y en las modificaciones que se presenten con el tiempo.

5) Administración: La planificación urbana depende de gran manera de la administración, por ello la ingeniería de tránsito debe contemplar la necesidad de examinar las relaciones entre las diversas instituciones involucradas en materia vial. En resumen se puede decir que se debe contemplar todos los aspectos económico, político, fiscal, de relaciones públicas, de sanciones, etc.

2.2.2 Tipos de solución

Como se ha descrito hasta ahora, la ingeniería de tránsito tiene bajo su control el manejo de algunos elementos que están involucrados directamente en la congestión vehicular, como son las vialidades, intersecciones y dispositivos de control. Por estas

razones se mencionó con anterioridad, que el problema de la congestión puede ser tratado en gran parte mediante la ingeniería de transporte.

No obstante debe tenerse en cuenta que es imposible desaparecer la congestión por completo, especialmente en ciertos cruces y en determinadas horas del día.

Esto se debe principalmente a que las relaciones de los costos de aumentar la capacidad física de las vías, de desviar a los usuarios a otros modos u otros horarios y a la posible implantación de normas restrictivas a los usuarios para circular en ciertos lugares o ciertas horas, resultan en muchos casos, mayores a los costos asociados a la congestión vehicular. Por ello, deben analizarse meticulosamente las medidas a tomar a fin de obtener beneficios reales y mitigar los impactos producidos.

A partir de esta primera observación, resultan tres tipos de soluciones al problema (Cal y Cárdenas, 1994):

1) Solución integral. Mediante la construcción de nuevas vialidades, con nuevos trazos, destinados a buscar un equilibrio entre la oferta y la demanda. Cabe destacar que este tipo de soluciones es casi imposible de aplicar en ciudades modernas, puesto que supone reemplazar gran parte de la infraestructura física existente.

2) Solución parcial de alto costo. Este tipo de solución supone mejorar la infraestructura carretera actual, para satisfacer el incremento de la demanda. Las mejoras a calles angostas, cruceros peligrosos, obstrucciones naturales, capacidad restringida, falta de control en la circulación, etc., siempre conllevan una gran inversión. Parte de las medidas a tomar pueden ser: ensanchamiento de calles, modificación de las intersecciones, estacionamientos públicos y privados.

3) Solución parcial de bajo costo. Consiste en aprovechar al máximo la infraestructura existente, con inversiones bajas en este rubro y maximizando la regulación del tránsito por medio de técnicas depuradas. Incluye la legislación y reglamentación adaptadas a las necesidades del tránsito; las medidas necesarias de educación vial; el proyecto específico y apropiado de señales de tránsito y semáforos; la canalización del tránsito a bajo costo, entre otros.

Además de estas tres categorías, Alberto Bull (2003), propone la generación de soluciones al aplicar acciones concretas sobre la demanda y sobre la oferta del transporte. A continuación se describen las medidas más utilizadas en cada uno de los casos (Bull, 2003):

A) Mediante acciones sobre la demanda del transporte: Debido a que la necesidad de viajar sucede en horas específicas como en la mañana, tarde y noche, todos los viajes se acumulan en dichos espacios de tiempo y en lugares específicos de gran demanda.

Por ello, éste tipo de medidas van dirigidas a controlar dichos viajes que la población realiza para desarrollar sus diferentes actividades: trabajo, escuela, esparcimiento, etc.

Algunas medidas concretas que pueden tomarse son (Bull, 2003):

A.1 El control de estacionamientos: Los automóviles particulares que son, en general los que contribuyen más a la generación de congestión, no se mantienen en movimiento continuo durante el día, ya que al desplazar a las personas a su lugar de trabajo, escuela o esparcimiento, quedan en estado de reposo hasta que el usuario deba regresar al origen de su viaje. Por esta razón los estacionamientos pueden ser manejados como herramienta para aminorar la congestión. Al regular el espacio disponible en distintas zonas de la ciudad, se crea un desincentivo al uso de los vehículos particulares. De esta manera, la ciudadanía aprende que no cualquier viaje en automóvil resulta conveniente. El control de estacionamientos también tiene por objeto liberar el espacio de calles y avenidas a fin de mantener la capacidad de las vías para el libre flujo vehicular.

A.2 El escalonamiento de horarios: En general, en las ciudades se presentan marcados horarios de máxima demanda en donde se concentran grandes números de viajes, concentrándose principalmente por la mañana, tarde y noche. El escalonamiento de horarios entonces permite establecer distintas horas de entrada y salida de las distintas actividades de las grandes urbes como trabajo, comercio, escuelas, universidades y muchas otras. De esta manera se obtendrá una distribución de viajes más repartida en el tiempo, reduciendo los volúmenes de tránsito en horas punta y por lo tanto una reducción considerable en la congestión generada.

A.3 Restricción vehicular: Esta medida está directamente enfocada a reducir el movimiento del parque vehicular total de las ciudades, sin afectar el derecho a la compra de vehículos. Generalmente se reduce la congestión y la contaminación ambiental a la par, mediante la prohibición de la circulación de vehículos en determinadas zonas y lapsos de tiempo en el transcurso de la semana. Un ejemplo claro de esta medida en la ZMVM es el programa Hoy no Circula, en donde dependiendo de un número asignado, se limita la circulación del vehículo en cuestión un día o más a la semana y al mes.

A.4 Tarifación vial: Como se ha mencionado, la congestión de tránsito se debe en gran parte al uso de vehículos particulares, en donde el usuario no percibe los costos que genera a los demás al circular con su propio vehículo. En la tarifación vehicular se busca destinar parte de los costos al usuario al realizar un cobro por circular en ciertas vías y zonas específicas en periodos de tiempo específicos de acuerdo al nivel de congestión en dicha zona. De esta manera se desincentiva al usuario de usar su vehículo particular en ciertas zonas y horas determinadas.

B) Mediante acciones sobre la oferta del transporte: Para suplir la necesidad de la realización de viajes en una ciudad, se requiere de ciertos medios que lo hagan posible. A estos medios se les conoce como oferta de transporte. De forma muy general los podemos dividir en infraestructura (vialidades, sistemas de control, etc.), vehículos y la forma en que se gestionan (Bull, 2003).

De la interacción de estos tres elementos, surge la capacidad de una vialidad que suele medirse como la cantidad de vehículos que pueden circular por ese sitio en particular en un cierto periodo de tiempo.

Queda claro entonces que las medidas sobre la oferta del transporte para reducir la congestión vehicular, van dirigidas a mejorar esta capacidad vial mediante la mejora de la infraestructura, los vehículos, su operación ó mediante la mejora de los tres en conjunto. Algunas acciones concretas son:

B.1 Sistemas de Metros: Construir o ampliar los sistemas de Metros deben ser soluciones cuidadosamente estudiadas y acompañadas de otras acciones como el control de los estacionamientos a fin de que el usuario tenga libertad de cambiar de modo de transporte ya se sea de su auto o bicicleta al sistema subterráneo.

B.2 Carriles y vías segregadas: El transporte público de pasajeros es responsable de la movilización de la mayoría de las personas en las ciudades. Por ello, separar carriles y vialidades a este tipo de transporte, es una de las mejores medidas actuales para resolver los fuertes problemas de congestión de las grandes urbes. En Latinoamérica en particular se cuenta con varios ejemplos exitosos de la aplicación de este tipo de soluciones. Cabe mencionar que para que se obtengan los resultados esperados, se deben combinar otras soluciones como acciones sobre las intersecciones y la coordinación de semáforos para ayudar a que los transportes públicos con vías dedicadas tengan preferencias de paso, ayudando a mejorar sus velocidades de operación y por tanto su capacidad y nivel de servicio. Estas acciones en conjunto servirán además para alentar el uso de estos tipos de transporte y desalentar el uso de automóviles particulares.

B.3 Sistema de transporte público superior: Además de la separación física de los diversos tipos de transportes, la puesta en marcha de servicios diferenciados o con altos estándares de calidad y niveles de servicio, ayudarán a atraer a los automovilistas a estos sistemas.

B.4 Acciones sobre las vías: La ampliación de la capacidad física es una de las principales acciones a las que se recurren hoy en día, particularmente en los países en vías de desarrollo. No obstante, se debe tener en cuenta que la limitante de las acciones sobre este rubro, es que dicha ampliación tiende a resolver el problema en el corto plazo, ya que en el largo plazo, la demanda tiende a incrementarse debido a la fluidez que dicha ampliación genera en las vías. Esto quiere decir, que la mejora en la capacidad de las vías atrae a más conductores, haciendo que la capacidad vuelva a ser rebasada tal como al principio.

B.5 Acciones sobre las intersecciones: Se considera que las intersecciones juegan un rol importante en la definición de la capacidad de las vías ya que son puntos en donde se deben alternar los flujos vehiculares y por tanto se impone una restricción al libre tránsito en aquellas vialidades que se cruzan entre sí. Por naturaleza, dichos puntos de intersección crean cuellos de botella y por tanto las acciones sobre estos puntos son determinantes en mitigar la congestión en las vialidades en general.

B.6 Coordinación de semáforos: A comparación de las acciones enfocadas a la ampliación de las vialidades, éste tipo de acción va enfocada a mejorar la operación de las intersecciones por medio de sistemas semaforicos. Estos sistemas han probado ser tecnologías precisas y económicas en la regulación de los flujos vehiculares, puesto que les permite desplazarse a velocidades considerables, minimizando las interrupciones de movimiento impuestas por el alto total.

En el presente trabajo se profundiza en las soluciones parciales de bajo costo y particularmente abordando el manejo del tránsito por medio de dichos los sistemas de semáforos instalados en las intersecciones conflictivas. Por ello en los capítulos subsecuentes se enfocarán a detallar la forma de operación de las intersecciones semaforizadas.

2.2.3 Metodología general para la solución de problemas de tránsito

Antes de pasar a los temas mencionados, es relevante conocer el método de solución de problemas de tránsito, el cual está conformada principalmente por cuatro etapas sucesivas que permiten conocer y particularizar las soluciones arribas mencionadas al

caso concreto en estudio, a fin de generar beneficios económicos, sociales y ambientales suficientes que justifiquen el costo de aplicar la solución en cuestión.

Las cuatro etapas son (Cal y Cárdenas, 1994):

1) Recopilación de datos: Es necesario reunir toda la información necesaria en forma de datos estadísticos e informes oficiales, o en su defecto mediante la captura manual de la información requerida para el análisis.

2) Análisis de datos: Con la información necesaria, se procede a obtener un diagnóstico del estado actual de la zona de estudio para poder establecer las soluciones debidas.

3) Proposición concreta y detallada: Se refiere a la presentación de proyecto de solución que contemple los aspectos físicos de infraestructura y operación de la misma. Además especificando las guías necesarias en cuanto a educación vial y las estructuras normativas requeridas para la solución de la problemática.

4) Estudio de los resultados obtenidos. Es de vital importancia observar durante cierto tiempo el resultado que tuvo la solución aplicada. El resultado debe ser comparado con la situación anterior a la aplicación de la solución. Es posible que a partir del estudio de los resultados se requiera un perfeccionamiento de la solución.

2.3 Dispositivos de control de tránsito en intersecciones

2.3.1 Intersecciones

En primer lugar, una intersección se define como el cruce de dos o más vialidades. Los tramos de vías que confluyen en la intersección se les llaman ramales. Como se ha mencionado con anterioridad, estos puntos son cruciales en el sistema vial pues en general son zonas en donde los usuarios pueden cambiar de trayectoria para llegar su destino. Por ello es necesario operarlas adecuadamente para evitar conflictos entre los distintos movimientos (Jiménez, 2013).

Desde el punto de vista de la capacidad vial, estos puntos son críticos ya que pueden disminuir el nivel de servicio de la vialidad al reducir la velocidad del tránsito, y debido a que son puntos que se congestionan primero, los conductores deben esperar cierto tiempo para atravesar la intersección. Además, un adecuado manejo de estos puntos también ayuda a disminuir los accidentes.

Dependiendo de la forma en que se cruzan dichas vías, obtendremos varios tipos de intersecciones. A continuación se describen las más comunes.

2.3.2 Tipo de intersecciones

De acuerdo al *Manual de Carreteras: Diseño Geométrico* (DG-2013), las intersecciones se clasifican de acuerdo al número de ramales y de acuerdo a su forma geométrica:

1. Intersección Tipo T: Son intersecciones conformadas por tres ramales (*Figura 2.10*), en donde uno de los ramales es principal y uno de los otros sirve para desahogar o desviar la vialidad.

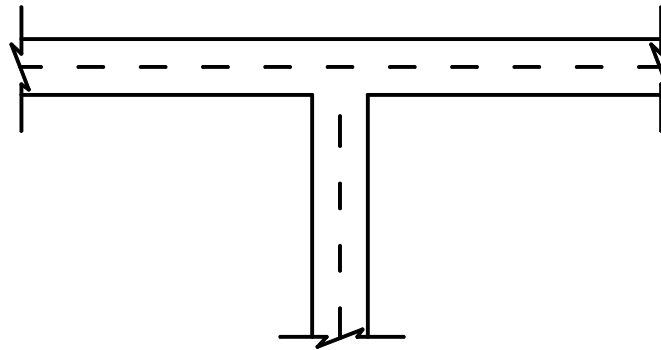


Figura 2.10 Intersección tipo T
Fuente: Elaboración propia

2. Intersección Tipo Y: También se compone por tres ramas. En este caso pueden existir dos configuraciones: el primero en donde dos ramales se unen y forman uno principal (*Figura 2.11*), o viceversa, en donde un ramal se divide en dos direcciones diferentes.

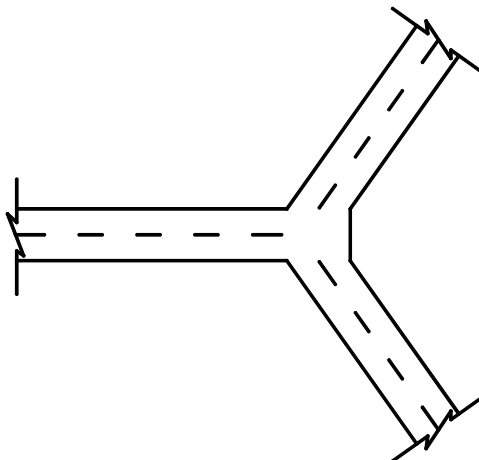


Figura 2.11 Intersección tipo Y
Fuente: Elaboración propia

3. Intersección Tipo Cruz (*Figura 2.12*): Se componen por cuatro ramas que forman una cruz.

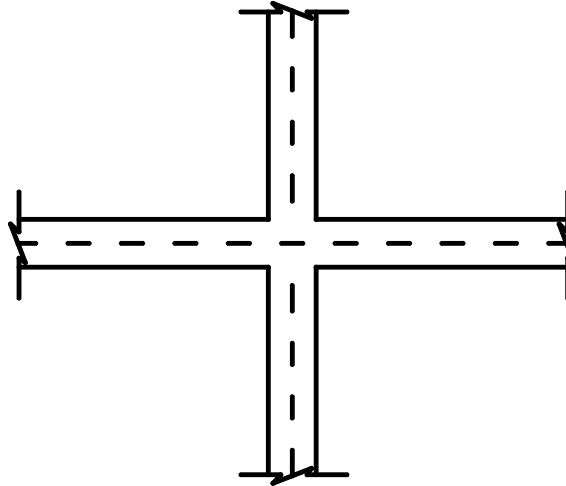


Figura 2.12 Intersección tipo Cruz
Fuente: Elaboración propia

4. Intersección Tipo X (*Figura 2.13*): Al igual que en la intersección tipo cruz, se forman con cuatro ramas que se cruzan entre sí en ángulos distintos a 90° .

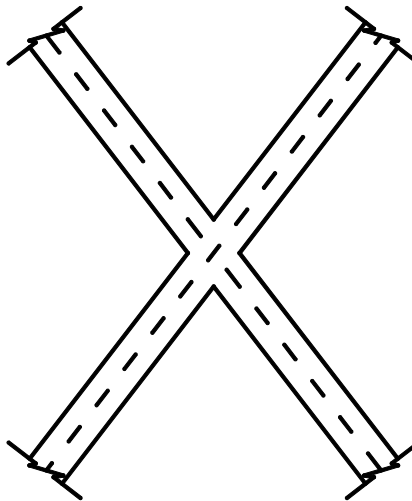


Figura 2.13 Intersección tipo X
Fuente: Elaboración propia

4. Intersecciones múltiples (*Figura 2.14*): Se compone por más de cuatro ramas y se consideran de las intersecciones más complicadas de operar.

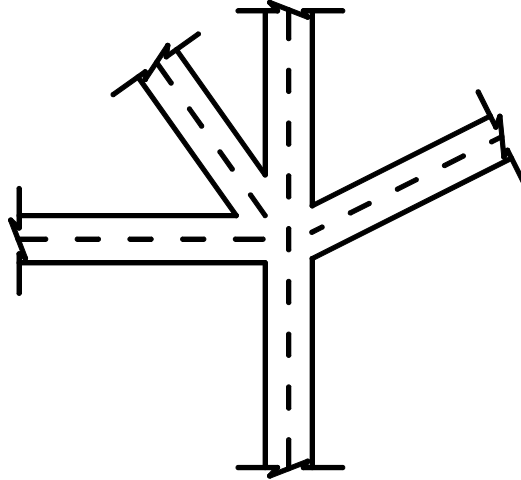


Figura 2.14 Intersección múltiple

Fuente: Elaboración propia

5. Intersección Desfasada (*Figura 2.15*): Puede referirse a una intersección tipo cruz, con la diferencia que un par de sus ramas no se encuentran alineadas entre sí.

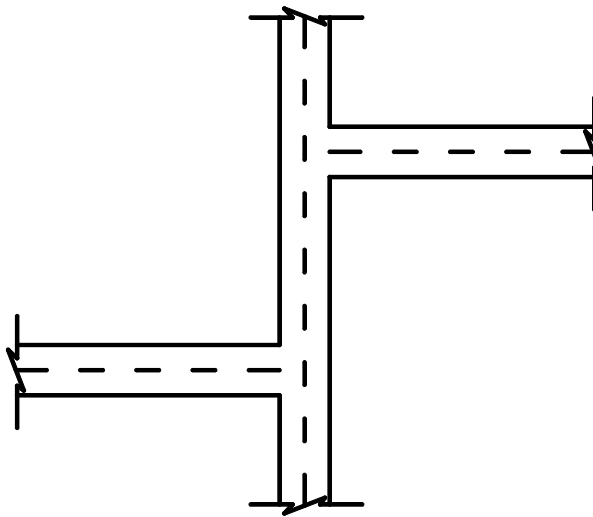


Figura 2.15 Intersección Desfasada

Fuente: Elaboración propia

6. Intersección giratorias: Se les conoce también como rotondas o glorietas. Este tipo de intersecciones une los tramos de vías sobre un aro circular donde los vehículos tienen que girar hasta encontrar la vía hacia donde se dirigen. En este tipo de intersecciones no se suelen usar semáforos pues tiene como objetivo el flujo constante a través de este punto (*Figura 2.16*).

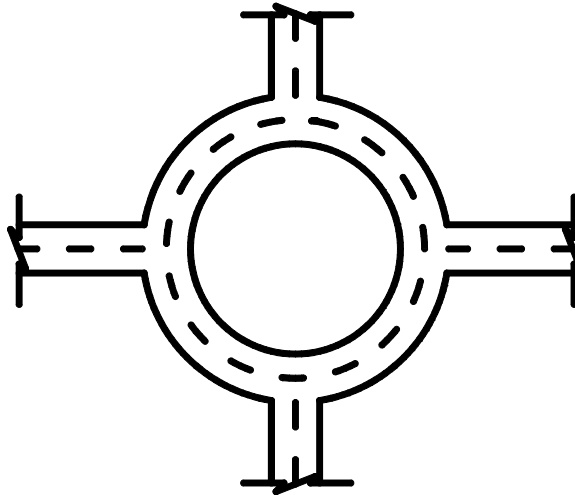


Figura 2.16 Intersección giratoria

Fuente: Elaboración propia

Además de la clasificación descrita, también se suele clasificar a las intersecciones de acuerdo al tipo de regulación de tráfico utilizado como puede ser (Jiménez, 2013):

A) Regulación mediante dispositivos de control: En este tipo de intersecciones se busca equilibrar los flujos vehiculares provenientes de los distintos ramales que se cruzan entre sí; también se instalan dispositivos de control para priorizar el movimiento de los vehículos y/o peatones provenientes de las vialidades principales. En ambos casos se busca minimizar los tiempos de espera o demora en la intersección.

B) Regulación mediante glorietas: Al contrario que la regulación mediante dispositivos de control, cuando se diseña una glorieta o rotonda, no se busca dar prioridad de paso a ningún flujo vehicular procedente de los distintos ramales. El objetivo de la glorieta es proveer movimientos continuos y poca reducción de velocidad de los distintos flujos vehiculares.

2.3.3 Dispositivos de control

Como se ha mencionado, los flujos vehiculares en las intersecciones se pueden regular mediante diversos dispositivos de control cuya instalación y operación corre a cargo de las distintas entidades de gobierno encargadas de las comunicaciones y transporte (tal como la STC, SEMOVI, SOBSE, etc.).

Por ello, se definen a los dispositivos de control, como aquellos elementos que se encuentran adyacentes a las calles y vialidades de una localidad, que proveen información de forma anticipada acerca de ciertas condiciones de circulación, tanto a los conductores como a peatones que conviven dentro de un sistema vial con el fin de ordenar y reglamentar su comportamiento (Cal y Cárdenas, 1994).

Los dispositivos para el control del tránsito en calles y carreteras se clasifican en (Cal y Cárdenas, 1994):

1. Señales

- Preventivas.
- Restrictivas.
- Informativas.
- Marcas.
- Rayas.
- Símbolos.
- Letras.

3. Obras y dispositivos diversos:

- Cercas.
- Defensas.
- Indicadores de obstáculos.
- Indicadores de alineamiento.
- Tachuelas o botones.
- Reglas y tubos guías.
- Bordos.
- Vibradores.
- Indicadores de curva peligrosa.

4. Dispositivos para protección en obra:

- Señales preventivas, restrictivas e informativas.
- Canalizadores.
- Señales manuales.

5. Semáforos:

- Vehiculares.
- Peatonales.
- Especiales.

En las *Figura 2.17*, podemos observar algunos ejemplos de señales preventivas que indican la existencia de un semáforo, un tope, etc. La *Figura 2.18* muestra señales restrictivas que restringen el paso o indican la dirección que el conductor puede seguir. Por su parte la *Figura 2.19* muestra algunas marcas pintadas en calles y avenidas que dan indicaciones a los usuarios. Finalmente la *Figura 2.20* nos muestra un elemento para reducción de velocidad.



Figura 2.17 Señales preventivas



Figura 2.18 Señales restrictivas

Fuente: Portal Conduzca

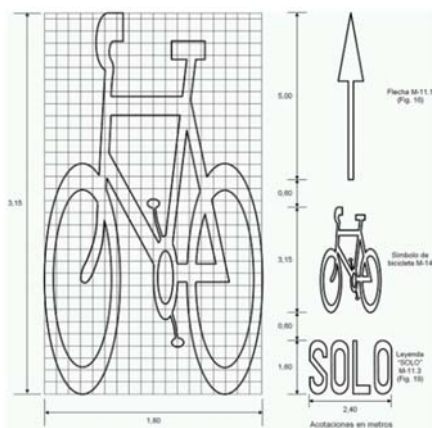


Figura 2.19 Marcas



Figura 2.20 Reductores de velocidad

Fuente SCT y Diariocol respectivamente

En la *Figura 2.21* observamos algunos ejemplos de señales para indicar obras en el camino e instrucciones que los conductores deben seguir. La *Figura 2.222* muestra elementos auxiliares utilizados para desviar y prevenir accidentes en obras. Finalmente las *Figuras 2.23* y *2.24* muestran ejemplos de semáforos vehiculares y peatonales.



Figura 2.21 Señales para control de obra *Figura 2.22* Elementos auxiliares para obra
Fuente Blog La información y Comercializadora grupo fractal



Figura 2.23 Semáforo vehicular

Figura 2.24 Semáforo peatonal

Fuente GPLeds

Ahora bien, para cumplir su objetivo, los dispositivos de control deben llenar ciertos requisitos, tales como (Cal y Cárdenas, 1994):

- Tener adecuadas características de tamaño, color, iluminación y efecto reflejante para llamar la atención del usuario para transmitir el mensaje deseado de forma clara y sencilla.
- Estar ubicado dentro del campo visual de los usuarios a quien se desea brindar información. A su vez, deben estar colocados en cuya posición llame la atención de los conductores y les permita reaccionar adecuadamente.
- Debe existir uniformidad en los diseños, tamaños, ubicaciones y en la información proporcionada al usuario a lo largo y ancho del sistema vial a fin de evitar confusiones a los mismos.
- Se debe buscar mantener a los dispositivos de control en perfecto estado estético mediante la aplicación de un programa de mantenimiento regular.

2.3.4 Semáforos

Se define a los semáforos como dispositivos electromagnéticos y/o electrónicos que proyectan indicaciones visuales de luces de colores (verde, amarillo y rojo), que ayudan al control vehicular y peatonal en los diferentes tipos de intersecciones. Su finalidad principal es la de permitir el paso, alternadamente, a las corrientes de tránsito que se cruzan, permitiendo el uso ordenado y seguro del espacio disponible (SCT, 1986).

Históricamente los semáforos han ido evolucionando gradualmente con el paso del tiempo a la par del crecimiento desmesurado de las ciudades y del consecuente problema de congestión.

Los avances tecnológicos han hecho posible la evolución de los sistemas de semáforos, de tal forma que en el presente se cuenta con sistemas de cómputo, detectores de volúmenes vehiculares, cámaras, centros de mando, entre otros, que permiten establecer estrategias complejas para controlar los flujos vehiculares de las vialidades, inclusive en tiempo real.

En la *Figura 2.25* se puede observar los primeros semáforos instalados en Inglaterra y Estados Unidos, en éste último era necesario que un policía manejara el dispositivo. En las *Figuras 2.26* y *2.27* observamos la evolución de los semáforos con tecnologías Led's y con distintas configuraciones.

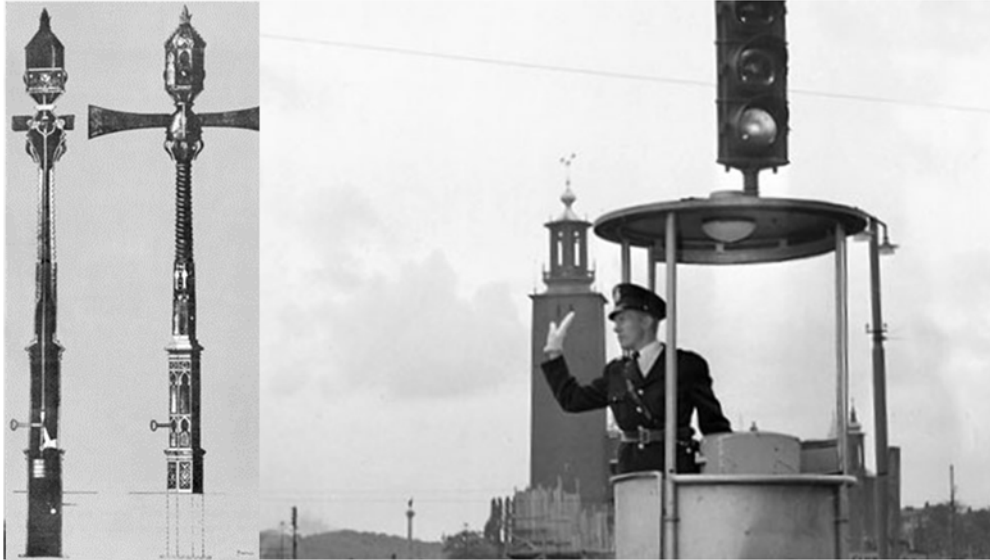


Figura 2.25 Primeros Semáforos instalados en Inglaterra y EU
Fuente: Sofía Bejarano, Blog Tiempos de Enfoque y del Blog Qualitas Auto



Figura 2.26 Semáforo con solo dos lentes



Figura 2.27 Semáforos con luz LED

Fuente: Trafictec

2.3.4.1 Ventajas y desventajas

En la actualidad para poder determinar las diversas ventajas y desventajas que se obtendrán al instalar y operar un sistema de semáforos en una o varias vialidades, es indispensable realizar un estudio integral de las intersecciones donde se desea mejorar el tránsito y flujo vehicular, ya que de ello dependerá el tipo de semáforo así como la configuración de tiempos óptimos de las fases de los semáforos a fin de lograr el objetivo de mejorar la movilidad de los vehículos. También es indispensable comprobar el funcionamiento del sistema una vez que se ha instalado a fin de corroborar que el sistema cumple con las necesidades del tránsito y de la intersección en cuestión.

De esta manera al instalar un sistema de semáforos, se obtienen las siguientes ventajas (Cal y Cárdenas, 1994):

- Ordena la circulación del tránsito y optimiza la capacidad de las vialidades y de la intersección.
- Reduce la frecuencia de accidentes.
- Estableciendo correctamente los tiempos de operación de los semáforos se puede obtener circulación continua en la intersección, o casi continua y velocidades continuas.
- Permite reducir las velocidades del flujo vehicular para evitar accidentes.
- Permite coordinar de manera equitativa el paso de vehículos en las intersecciones y permite conceder el paso de peatones de forma segura.
- En grandes ciudades que cuentan con miles de intersecciones, permite un ahorro considerable de recursos, comparados por ejemplo con la utilización de señales de tránsito o policías de tránsito.

Por el contrario, cuando el estudio de las necesidades de la intersección es deficiente o la instalación no es óptima y el sistema de semáforos solo se ha implementado como remedio general para resolver los problemas de tránsito, se pueden presentar las siguientes desventajas (Cal y Cárdenas, 1994):

- El gasto en la implementación del sistema de semáforos puede resultar elevado e injustificado.
- Causan demoras innecesarias a los conductores, viéndose afectados principalmente los volúmenes de tránsito pequeño al tener que esperar demasiado por el cambio del color de la luz roja o del tiempo total de ciclo.
- Pueden inducir a la falta de respeto del señalamiento y a las autoridades que implementan dicho sistema.
- Incrementan el número de accidentes por cambios sorpresivos de color.

- En ciertas horas del día pueden producir pérdidas mayores de tiempo a ciertos usuarios, especialmente en horas de baja demanda cuando incluso puede no requerirse el control por medio de semáforos en la intersección.
- Si no se da un mantenimiento adecuado, por ejemplo en la realización de cambios de focos fundidos, se pueden incrementar sustancialmente los accidentes en las intersecciones.

Por las razones anteriores es fundamental determinar la conveniencia de la instalación de un sistema de semáforos.

También es indispensable conocer las partes y funcionamiento general de los semáforos, que en general son (SCT, 1986):

- Cabeza: Es la armadura que contiene las partes visibles del semáforo. Cada cabeza contiene un número determinado de caras orientadas en diferentes direcciones.
- Soportes: Los soportes son las estructuras que se utilizan para sujetarla cabeza de los semáforos de forma que les permitan algunos ajustes angulares, verticales y horizontales.
- Cara: Son las distintas luces de las cuales están formados los semáforos. En cada cara puede haber desde dos luces hasta más de tres, siendo la de tres luces las caras más usuales.
- Lente: Es la parte de la unidad óptica que por refracción dirige la luz proveniente de la lámpara y de su reflector en la dirección deseada. Este elemento desaparece en los nuevos semáforos de LED's.
- Visera: Es un elemento que se coloca encima o alrededor de cada una de las unidades ópticas, para evitar que, a determinadas horas, los rayos del sol incidan sobre éstas y den la impresión de estar iluminadas, así como también para impedir que la señal emitida por el semáforo sea vista desde otros lugares distintos hacia el cual está enfocado. Como el caso de las lentes, esta parte está desapareciendo ya que los nuevos semáforos de LED's iluminan de mejor forma que los antiguos.
- Placa de contraste: Elemento utilizado para incrementar la visibilidad del semáforo y evitar que otras fuentes lumínicas confundan al conductor.

En general, la mayoría de los semáforos cuentan desde tres lentes: rojo, ámbar y verde, hasta cinco lentes: rojo, ámbar, flecha de frente, flecha izquierda y flecha derecha.

Usualmente se recomiendan semáforos con dos caras para cada acceso a la intersección, adicionalmente con semáforos dedicados a los peatones. Esta es una

medida de seguridad a fin de evitar que vehículos grandes tapen una de las caras del semáforo, o cuando se descompone una cara del semáforo.

Las diferentes configuraciones de número de lentes y caras (mostradas en las *Figuras 2.28 y 2.29*), pueden estar presentes tanto en semáforos de tipo horizontal y/o vertical, y dependerá de las necesidades locales de la intersección, es decir del número de carriles, tipo de vueltas permitidas, etc.



Figura 2.28 Diferentes configuraciones de lentes
Fuente: Eyssa



Figura 2.29 Semáforos con cuatro caras y tres lentes
Fuente: Four Sides

2.3.4.2 Tipos de semáforos

Ahora bien, de acuerdo a su forma de operación, los semáforos se clasifican en:

1. Semáforos de tiempo fijo (Cal y Cárdenas, 1994):

Los semáforos de tiempo fijo se utilizan en intersecciones donde los patrones de tránsito son relativamente estables a lo largo del día o en aquellas intersecciones en donde las variaciones vehiculares sean pequeñas de tal forma que estableciendo un programa de funcionamiento de semáforos fijo, no se produzcan demoras o congestión severo.

Usualmente se utilizan los semáforos de tiempo fijo en intersecciones donde se desea sincronizar el funcionamiento de los semáforos de esa intersección con los de una intersección adyacente mediante una coordinación de semáforos simultánea (se examinará en un subtema más adelante).

Las ventajas de implementar un sistema de semáforos con tiempo fijo son, entre otras:

- Facilitan la coordinación con semáforos adyacentes, con más precisión que en el caso de semáforos accionados por el tránsito.
- El costo del equipo de tiempo fijo es menor que el del equipo accionado por el tránsito y su conservación es más sencilla y más económica.
- No se requieren detectores de tráfico lo que no perjudica ningún flujo vehicular de manera significativa.

En las intersecciones con semáforos de tiempo fijo se pueden instalar cajas de control de los tiempos de las fases de los semáforos aunque en aquellas intersecciones de poca importancia puede optarse por no instalar estos mecanismos de sincronización.

2. Semáforos de tiempo variable (Cal y Cárdenas, 1994):

Los semáforos de tiempo variable también son llamados semáforos accionados por el tránsito, lo cuales tienen como característica principal que la duración de los ciclos responden a las variaciones en la demanda de tránsito vehicular. Esta demanda es registrada por aparatos detectores conectados al control del semáforo. Se dice que el tipo de control es semi-accionado cuando solamente en algunos de los accesos de la intersección existen detectores. Cuando existen detectores en todos los accesos se tiene un tipo de control totalmente accionado. En cuanto a los detectores para registrar el paso de vehículos encontramos: detectores de presión, magnéticos, de radar, de inducción.

Para poder instalar este tipo de semáforos se debe analizar algunos factores como: volumen de vehículos, el movimiento transversal, las horas de máxima demanda, los peatones, accidentes, amplias fluctuaciones de tránsito, entre otros aspectos.

3. Semáforos Inteligentes

Con el progreso de las computadoras, se inició una investigación acerca de la posibilidad de registrar las variaciones de tránsito en forma automática y la eventualidad de que un equipo electrónico centralizado analizara los datos y tomara las decisiones para aplicar los programas más adecuados.

El desarrollo de los semáforos inteligentes ha sido el resultado de dichas investigaciones. Existen diferentes formas de implementar semáforos con inteligencia y esto puede abarcar desde una simple decisión del estado en que debe permanecer (luz verde o roja) de acuerdo al tránsito hasta una decisión de mayor jerarquía, como la de tomar una decisión a causa de un accidente, cambiar el flujo del tráfico, etc. La toma de decisión de un semáforo depende mucho del tipo de la tecnología que utiliza. En cada cruce, la espera de los semáforos depende de la congestión, la longitud de la cola y otros parámetros de entrada. La comunicación entre el semáforo y el algoritmo de decisión se puede realizar a través de internet.

Adicionalmente a la optimización del flujo vehicular, el semáforo inteligente puede aportar beneficios extras, entre ellos:

- Forzar semáforos para condiciones especiales (como el paso de policía, ambulancias, bomberos).
- Control de Infracciones, es posible que a través de las mismas cámaras se fotografié a los vehículos que se salten el semáforo cuando está en rojo.
- Integrando un radar, podrán controlar la velocidad de los vehículos al pasar por el semáforo.
- Incorporar paneles luminosos que dan información en tiempo real sobre las principales rutas y el tiempo estimado en cada instante.

2.3.4.3 Indicaciones de las luces

Las lentes de los semáforos para el control vehicular deberán ser de color rojo, amarillo y verde (SCT, 1986). Cuando se utilicen flechas, éstas también serán rojas, amarillas y verdes sobre fondo negro.

Las lentes de las caras de un semáforo deberán formar una línea vertical. El rojo debe encontrarse sobre la parte alta, en medio el amarillo, y el verde abajo.

Las flechas direccionales deberán apuntar en el sentido de la circulación permitida. La flecha vertical, apuntando hacia arriba, indica circulación de frente; la horizontal indica giro aproximadamente en ángulo recto hacia la izquierda o hacia la derecha, y la flecha oblicua a 45 grados apuntando hacia arriba indica giro a calles que forman un ángulo distinto al de 90 grados. Cuando la cara del semáforo contenga una o varias flechas direccionales con luz verde, el hecho de encenderse ésta o estas flechas, significa que los vehículos sólo pueden tomar la dirección o direcciones así indicadas (SCT, 1986).

La interpretación de los colores de los semáforos es como sigue (SCT, 1986):

a) Verde

Los conductores de los vehículos, y el tránsito vehicular que observe esta luz podrán seguir de frente o girar a la derecha, a menos que alguna señal (reflectorizada o preferentemente iluminada) prohíba dichos giros, siempre y cuando se tenga la vía despejada de peatones o de otros vehículos.

Los peatones que avancen hacia el semáforo y observen esta luz podrán cruzar la vía (por los pasos peatonales marcados) a menos que algún otro semáforo indique lo contrario.

Cuando la lente verde funcione con destellos intermitentes, advierte a los conductores el final de tiempo de luz verde cuando se utiliza la secuencia de rojo-verde-verde intermitente-rojo.

b) Amarillo

Advierte a los conductores de los vehículos que el período de verde asignado a un flujo vehicular ha terminado y está a punto de iniciar el período de rojo y, por lo tanto, debe asumir una conducta de prevención tal como sigue:

- Acabar su marcha si está muy próximo a la intersección y una frenada brusca podría ocasionar situaciones peligrosas con los vehículos de atrás.
- Detener su marcha con el fin de que la intersección no sea bloqueada y los vehículos de las demás corrientes pueden circular en el período de verde que va a iniciar.

Algunas condiciones físicas especiales de la intersección, tales como dimensiones, topografía (pendientes muy pronunciadas), altas velocidades de aproximación o tránsito intenso de vehículos pesados, requieren un intervalo o duración mayor que el normal para despejar la intersección. En tal caso, se empleará un intervalo normal de amarillo seguido de la luz roja en todas las direcciones, durante otro intervalo adicional, para desalojar totalmente la intersección.

En ningún caso se cambiará de luz verde a luz roja o rojo intermitente sin que antes aparezca el amarillo durante el intervalo necesario para desalojar la intersección. Sin embargo, no se empleará en cambios de rojo a verde total con flecha direccional, o al amarillo intermitente.

Cuando se ilumine la lente amarilla con destellos intermitentes, los conductores de los vehículos realizarán el cruce con precaución. El amarillo intermitente deberá emplearse en la vía que tenga preferencia. El amarillo fijo no debe ser usado como señal de precaución.

c) Rojo

Los vehículos y el tránsito vehicular deben detenerse antes de la línea de PARE y si no la hay a una distancia de dos metros antes del semáforo, deben permanecer parados hasta que aparezca el verde correspondiente. Es recomendable que en los tiempos de seguridad de las intersecciones siempre se incluya un período de todo rojo como parte de éste.

Ningún peatón frente a esta luz debe cruzar la vía, a menos que esté seguro de no interferir con algún vehículo o que un semáforo peatonal indique su paso.

Nunca deberán aparecer simultáneamente combinaciones en los colores de los semáforos, excepto cuando haya flechas direccionales con amarillo o con rojo, o cuando se use el amarillo con rojo para alertar a los conductores del próximo cambio a verde.

Cuando se ilumine una lente roja con destellos intermitentes, los conductores de los vehículos harán un PARE obligatorio y se detendrán antes de la línea de PARE. El rojo intermitente se empleará en el acceso a una vía preferencial.

d) Flechas para giro a la izquierda o a la derecha:

- Los conductores de los vehículos girarán a la izquierda o a la derecha, según lo indique la flecha, y de acuerdo con el color que exhiban.
- El tránsito vehicular que gira en una intersección debe ceder el derecho de vía a los peatones que se encuentren legalmente dentro de la calzada.
- La eficiencia de las flechas direccionales se aumenta considerablemente si existen canales especiales para el movimiento o giro indicado, complementados con marcas en el pavimento y con una señalización adecuada.
- Cuando se intenta permitir que el tránsito se mueva desde cierto carril haciendo determinado giro, pero prohibiendo que proceda de frente, deben encenderse la lente roja para esos vehículos al mismo tiempo que la lente verde con flecha hacia el lado que permita el giro. Cuando se intenta permitir que el tránsito direccional o desde cualquier carril proceda de frente, pero prohibiéndole cierto giro o giros, debe iluminarse una flecha verde para cada una de las direcciones y la lente roja de la misma cara no debe encenderse.
- Las flechas serán la única parte iluminada de la lente

2.3.4.4 Establecimiento de los tiempos del semáforo

Para poder empezar a realizar un análisis de los tiempos de semáforo, es necesario conocer algunos términos utilizados comúnmente en la operación de una intersección semaforizada (Cal y Cárdenas, 1994):

1. Indicaciones de señal: Es el encendido de una luz (verde, amarillo y/o rojo), o la combinación de luces encendidas en el mismo instante.

2. Ciclo: Es el tiempo necesario que tarda el semáforo para completar la secuencia completa de las luces. También se le conoce como tiempo total de ciclo.

3. Movimiento: Es la maniobra o el conjunto de ellas que tienen derecho de paso simultáneamente.

4. Intervalo: El espacio de tiempo dentro de un ciclo donde no cambian las indicaciones de señal.

5. Fase: Es la parte del ciclo en donde se presentan uno o más movimientos simultáneos. Por medio de las fases se ordenan los movimientos que tendrán derecho de paso en uno o varios intervalos. Se puede decir que una fase comienza cuando los flujos vehiculares con derecho de paso empiezan a perderlo, es decir cuando comienza la luz amarilla, y termina cuando el otro u otros flujos pierden su derecho de paso, es decir al término de la luz verde. En general, una fase comprende un intervalo de luz amarilla, uno de todo rojo y uno verde.

6. Secuencia de fases: El orden en que se presentan cada una de las fases.

7. Reparto: Parte del tiempo total de ciclo asignado a cada una de las fases.

8. Intervalo de despeje: Es el tiempo destinado a la luz amarilla que da la advertencia de que la fase está por terminar.

9. Intervalo todo rojo: Es el tiempo de indicación de la luz roja destinado a permitir el despeje de la intersección para el movimiento que tiene el derecho de paso después de la luz amarilla.

10. Intervalo de cambio de fase: Es un periodo de tiempo dentro del ciclo que incluye la indicación de amarillo de advertencia de cambio de fase y que puede incluir un intervalo de todo rojo.

En las *Figuras 2.30 y 2.31* se muestran esquemas que permiten comprender mejor algunos de los conceptos mencionados.

Ahora bien, los tiempos del semáforo se deben establecer a fin de que se puedan obtener el mínimo tiempo de demora en las intersecciones. Esto se logra al permitir el mayor número de movimientos en cada una de las fases para permitir el paso de la mayor cantidad de vehículos posible.

Además, se debe buscar reducir el número de fases al mínimo, con la condición de que el total de fases garanticen la suficiente seguridad en los movimientos realizados y permita obtener la máxima eficiencia en permitir el paso del máximo flujo vehicular. Las secuencias de fases en conjunto deben buscar de reducir las demoras en los intervalos donde se limita el derecho de paso de los diversos accesos a la intersección.

Finalmente, la distribución de tiempos del semáforo está relacionada directamente con los volúmenes de tránsito de cada movimiento o movimientos. Esto quiere decir, que los tiempos de cada fase y cada ciclo dependen de la demanda de la intersección.

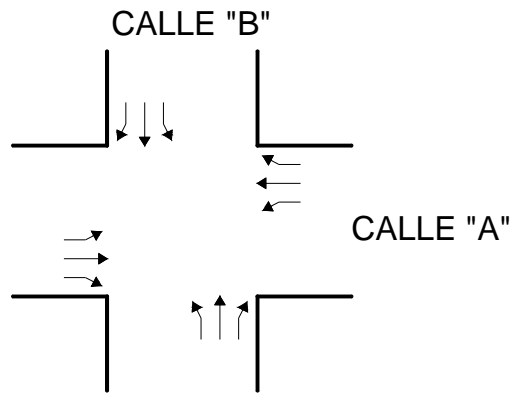


Figura 2.30 Movimientos en una intersección

Fuente: Elaboración propia basada en imagen del libro "Ingeniería de Tránsito" de Cal y Cárdenas, 1994, página 398.

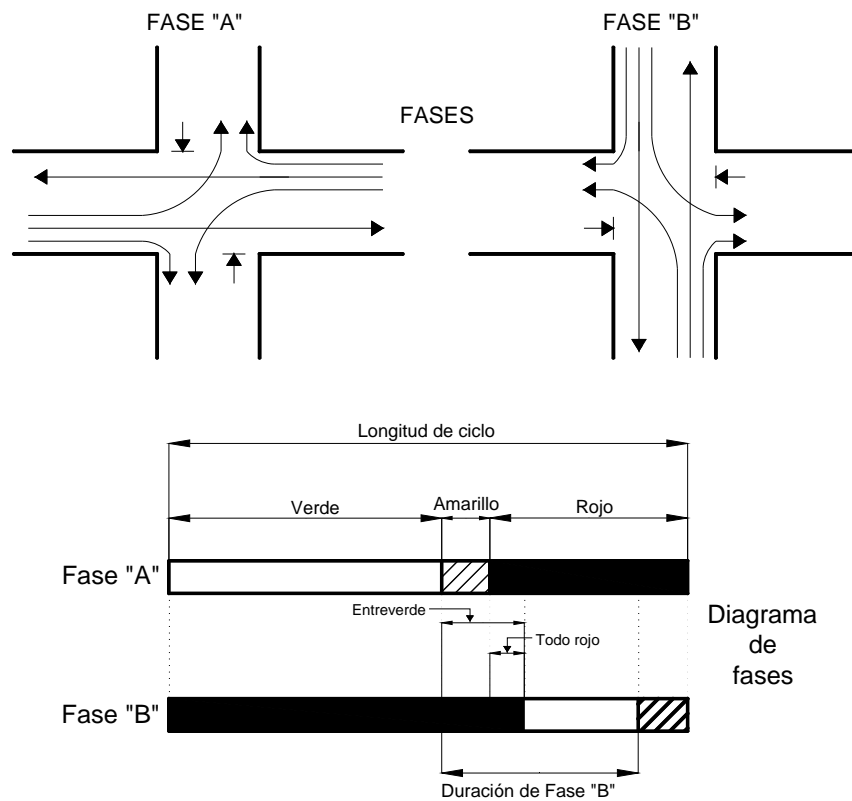


Figura 2.31 Fases y diagrama de fases en una intersección

Fuente: Elaboración propia basada en imagen del libro "Ingeniería de Tránsito" de Cal y Cárdenas, 1994, página 398.

2.3.4.6 Coordinación de semáforos

Los semáforos de tiempo fijo que se encuentran dentro de un radio de 400 metros y que cuentan con condiciones de tránsito similares entre sí, deben de coordinarse por medio de interconexiones por cable o vía radio. Dependiendo del caso, en distancias mayores también resulta eficaz la coordinación de los semáforos (Cal y Cárdenas, 1994).

En general existen cuatro tipos de sistemas de coordinación de los semáforos de tiempo fijo, a continuación se describen (Cal, 1994 y SCT, 1986):

1. Sistema simultáneo: Sirven en intersecciones que se encuentran muy cercanas y que presentan condiciones de tráfico intenso. Los semáforos muestran la misma indicación de señal al mismo tiempo. Los tiempos de ciclo y las indicaciones de señal están calculados para beneficiar a las intersecciones principales, por lo que las otras intersecciones puedan no tener tiempos óptimos de semáforos.

2. Sistema alternado: Contrario al caso anterior, los semáforos de las intersecciones muestran indicaciones de señal contrarias a los semáforos adyacentes. Se requiere que las condiciones geométricas de las calles y/o avenidas sean uniformes y que no existan volúmenes vehiculares altos.

3. Sistema progresivo: Este sistema opera semáforos a lo largo de una calle o avenida donde se desea mantener a un grupo de vehículos en constante movimiento con cierta velocidad fija. Se controla por un control maestro que debe ser revisado constantemente por variaciones que pueden generarse por los cambios en el voltaje de suministro o por variaciones de temperatura del ambiente. El establecimiento de los tiempos de los semáforos en un sistema progresivo se hace por tanteos.

4. Sistema progresivo flexible: Tiene el mismo principio que los sistemas anteriores, con la diferencia que cada semáforo tiene la posibilidad de variar su programa de operación de acuerdo a ciertas necesidades como pueden ser el cambiar el derecho de paso a otras intersecciones en las horas de máxima demanda. Para lograr el correcto funcionamiento de este sistema, se debe contar con conteos vehiculares frecuentes.

2.3.4.7 Estudios de volúmenes

En relación con el punto anterior, se hace notable la necesidad de la recolección de cierta información específica de las intersecciones a analizar. Para ello existe amplia bibliografía relativa a la obtención de la información y a las metodologías utilizadas para

cada caso. Concretamente, en el caso de México se cuenta con el “*Manual de Estudios de Ingeniería de Tránsito*” publicado por *La Secretaría de Comunicaciones y Transporte* (SCT).

El principal estudio de interés para la realización del presente trabajo, es el estudio de volúmenes que son utilizados para determinar los volúmenes de tránsito, es decir, el número de vehículos que pasa un punto durante un periodo específico de tiempo. Esta información es de utilidad para la planeación, diseño y operación de vialidades, así como para trabajos de investigación del transporte.

Existen varios tipos de estudios de volúmenes, en la *Figura 2.32* extraída del manual, se detalla cada uno de ellos (SCT, s/f):

Tipo de volumen	Aplicación
Volumen Medio Diario ó volumen total de tránsito	Estudios de tendencias: Planeación de carreteras, selección de rutas, cálculo de tasas de accidentes, evaluaciones económicas
Volumen Clasificados: por tipo de vehículo, número de ejes y/o peso	Análisis de capacidad: Diseño geométrico, diseño estructural, estudios de cobros
Volúmenes durante periodos de tiempo específicos: durante horas picos, horas valle y por dirección	Aplicación de dispositivos de control de tránsito: diseño geométrico, desarrollo de reglamentos de tránsito

Figura 2.32 Tipos de estudios de volúmenes

Fuente: Elaboración propia basada en grafico del “Manual de Estudios de Ingeniería de Tránsito” de la SCT, página 6.

Los métodos comúnmente utilizados para la obtención de los volúmenes de tránsito son (SCT, s/f):

1. Aforos manuales

Se utilizan para contabilizar volúmenes direccionales y volúmenes clasificados. Se llegan a realizar aforos de hasta 24 horas de duración. Se utilizan hojas de captura de datos hasta contadores manuales electrónicos.

La desventaja de este tipo de aforo es que en ciertos periodos de alto flujo vehicular y en intersecciones complejas, se requiere de más personas para realizarlo. Este último pudiera provocar la pérdida de exactitud y confiabilidad de los aforos, ya que la información de calidad depende de un personal suficientemente capacitado y que tenga la supervisión necesaria.

2. Contadores mecánicos

Son utilizados para la obtención de volúmenes vehiculares continuos para estudios de tendencias. Pueden funcionar por medio de células fotoeléctricas, detectores magnéticos y detectores de lazo.

3. Contadores portátiles

Pueden ser tubos neumáticos y toman volúmenes vehiculares cada hora y cada quince minutos de forma permanente. Una de las principales ventajas es que una sola persona puede manejar varios contadores simultáneamente.

Su desventaja es que no permite clasificar los volúmenes por tipo de vehículo y por dirección y en ocasiones los contadores de tubo neumático cuentan más vehículos de los que realmente circulan.

El tiempo de aforo dependerá del método utilizado y del propósito del estudio. Por citar algunos ejemplos, los aforos manuales pueden realizarse por periodos de 12 horas. Por medio de contadores mecánicos se puede recolectar información de más de 24 horas. Se debe recordar que en la mayoría de los estudios de tránsito realizados, es recomendable la realización de aforos en días que sean representativos de un día de la semana típico, es decir, de martes a jueves. También se recomiendan aforos realizados en incrementos sucesivos de 15 minutos. Sólo en el diseño de carriles de giro y en el cálculo de tiempos del semáforo se requerirán intervalos menores de medición.

Los datos de los aforos se pueden presentar en formas de mapas de volúmenes de tránsito y con diagramas de volúmenes de tránsito direccionales en intersecciones. En las Figuras 2.33 se observan estos dos tipos de representación, extraídos directamente del “Manual de Estudios de Ingeniería de Tránsito”.

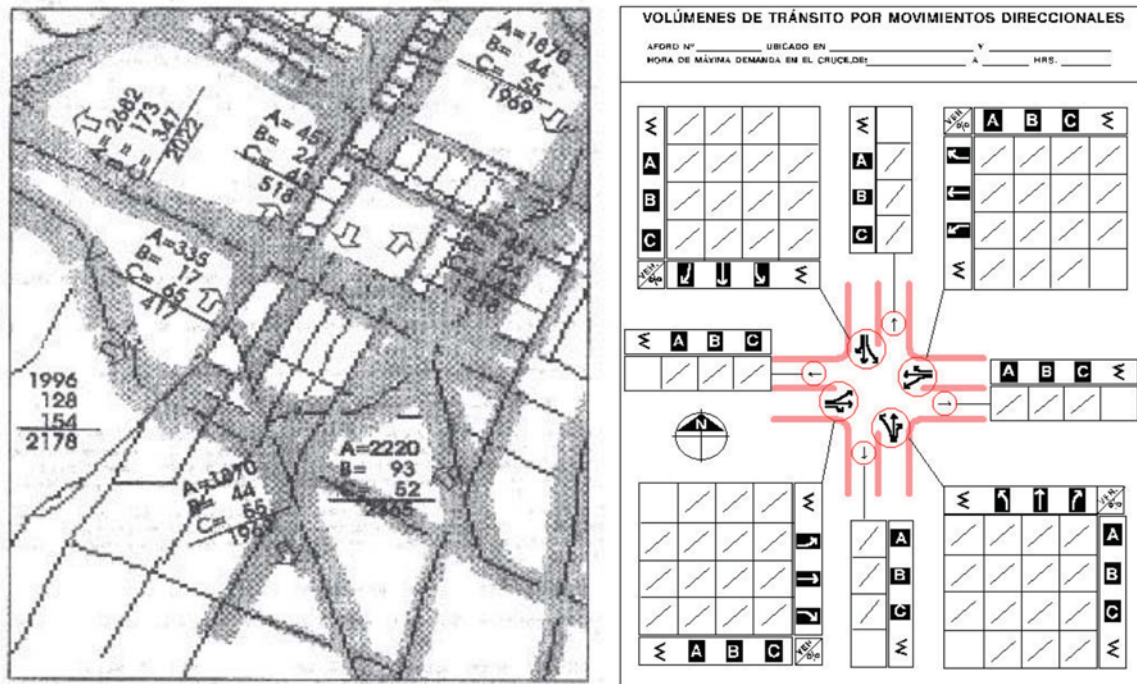


Figura 2.33 Mapas y diagramas de volúmenes de tránsito
Fuente: Manual de Estudios de Ingeniería de Tránsito de la SCT, página 9 y 10.

2.4 Simulación

Una vez establecidos los conceptos básicos de los elementos involucrados en el problema de la congestión, es necesario recurrir a una herramienta que nos permita representar las condiciones de tránsito actuales de la zona del caso de estudio y probar a priori, medidas y alternativas de solución, a fin de conocer su efectividad antes de su implementación.

En este sentido, la simulación puede ser una herramienta adecuada para alcanzar dichos fines. A continuación se presentan los conceptos fundamentales necesarios y posteriormente se aplican al problema planteado.

En primer lugar, para poder comprender qué es la simulación es necesario definir a un modelo como la representación abstracta, conceptual, gráfica, visual y/o física de un

fenómeno o sistema real con el fin de analizar su naturaleza y permitir una mejor comprensión del fenómeno real (EDUCAR, s/f).

Ahora bien, se denomina simulación, al proceso de experimentar con un modelo a fin de predecir el comportamiento del fenómeno o sistema representado ante diferentes condiciones planteadas (ABAD, 2002).

La experimentación con modelos ha evolucionado desde su aparición y se han utilizado ampliamente en procesos industriales, sociales, económicos, físicos, etc., es decir, de todo tipo de situaciones de la vida cotidiana (TEXSON, 2005).

El uso de la simulación se ha hecho extenso puesto que ofrece un método confiable para analizar el comportamiento de un sistema. Es preciso mencionar que aunque en el proceso de la simulación se sintetizan las relaciones existentes, las técnicas estadísticas y las herramientas computacionales proporcionan la confiabilidad necesaria de los resultados obtenidos en la mayoría de los casos (TEXSON, 2005).

Dentro de las áreas en donde se utiliza la simulación encontramos (TARIFA, s/f):

- **Manufactura:** La simulación ayuda a detectar posibles cuellos de botella, a distribuir personal y por ende ayuda a determinar la política de producción.
- **Industria:** Ayuda a mejorar los procedimientos de operación.
- **Clima:** Ayuda a predecir el comportamiento del clima y establecer sistemas de emergencias.
- **Salud:** Ayuda a conocer la forma de propagación de ciertas enfermedades o epidemias.
- **Diseño:** Permite seleccionar de entre los diversos materiales y formas disponibles en el mercado.
- **Educación:** Ayuda a transmitir conocimientos y experiencia a los alumnos para mejorar su capacidad de resolver problemas; además le permite a alumnos y maestros conocer diversos sistemas de computo, por mencionar un ejemplo.
- **Capacitación:** Un simulador permite el desarrollo profesional de un área específica a bajo costo y con riesgos casi nulos.
- **Transporte:** En la actualidad los modelos de simulación son utilizados para detectar posibles zonas de congestionamiento, zonas con altos índices de accidentes, así como en la predicción de la demanda a lo largo del día y del año.

2.4.1 Tipos de simulación

De acuerdo al tipo de modelo utilizado, la simulación puede ser de tipo (TARIFA, s/f):

- **Identidad:** Se utiliza una réplica exacta del sistema de estudio como es el caso del sector automotriz que utiliza vehículos reales para realizar los controles de calidad y las debidas pruebas de seguridad.
- **Cuasi-identidad:** Se utiliza un modelo ligeramente simplificado y se utiliza en casos donde se requiera hacer experimentos o pruebas no destructivas.
- **Laboratorio:** Se utilizan modelos a escala y se experimenta con ellos bajo condiciones estrictamente controladas.
- **Simulación por computadora:** El modelo es completamente simbólico y representado en lenguaje computacional. En este tipo de simulación encontramos tres elementos principales: el modelo, el analista y la interfaz, siendo ésta última la parte dedicada a interactuar con el usuario.

2.4.2 Ventajas y desventajas de la simulación

El uso de la simulación aporta ventajas y desventajas, de acuerdo con Tarifa (sin fecha), Abad (2002) y García (2006), estas son:

Ventajas:

- Ayuda a mejorar la comprensión del fenómeno o sistema ya que al tener que realizar un modelo, permite al analista conocer mejor todas y cada una de sus partes, así como sus relaciones.
- Permite su uso como forma de capacitación para la toma de decisiones.
- Permite la resolución de problemas cuando no es posible obtener una resolución analítica.
- Permite resolver problemas que aunque cuentan con resolución analítica, ésta es muy complicada y/o costosa de obtener.
- Es una excelente herramienta para conocer el impacto de cambios propuestos al fenómeno o sistema sin la necesidad de llevarlos a cabo en la realidad.
- Permite experimentar situaciones incluso antes de que exista el sistema a estudiar.
- Ayuda a probar varios escenarios en el modelo simulado cuando es imposible hacerlo sobre el sistema real, ya sea por lo costoso que resultaría ser o porque la prueba deseada sea destructiva.
- Sirve cuando los sistemas de estudio evolucionan muy lentamente en el tiempo.
- En modelos muy complejos, la simulación permite generar buenas soluciones.
- La tecnología ha evolucionado de tal forma, que las computadoras personales actuales permiten desarrollar modelos complejos y pueden ser manejados con relativa facilidad.

Desventajas:

- La realización del modelo puede resultar una tarea extensa y laboriosa.
- La formulación del modelo a simular puede resultar demasiado costosa en casos sencillos donde ya existen soluciones analíticas desarrolladas y probadas.
- El sistema o fenómeno puede ser tan complejo que su modelación tenga que omitir variables importantes, obteniendo resultados poco representativos.
- El analista debe dominar el software de computación de simulación y debe tener los conocimientos necesarios para poder interpretar los resultados de forma debida.
- El modelo de simulación por sí solo no proporciona soluciones al problema, ya que sólo representa el fenómeno estudiado, por lo que el analista debe proponer las soluciones al problema.

2.4.3 Etapas de la simulación

Para poder obtener resultados confiables, es necesario plantear la simulación adecuadamente. Para ello se definen distintas etapas para desarrollar la simulación (TARIFA, s/f y GARCÍA, 2006):

- **Formulación del problema:** En primer lugar se establecen los objetivos a alcanzar. También se delimita el problema y los alcances del modelo de simulación, así como el tipo de resultados que se obtendrán.
- **Definición del sistema:** Se detallan las fronteras del sistema a estudiar, así como las diversas interacciones con el exterior que se consideren oportunas.
- **Colección de datos y formulación del modelo:** Se recaba la información requerida para el análisis y se desarrolla propiamente el modelo capturando los aspectos más relevantes del sistema real en base al enfoque establecido o al objetivo del estudio en cuestión.
- **Implementación del modelo en la computadora:** Se ingresa la información anterior a un programa de cómputo especializado o en su caso se desarrolla el lenguaje necesario para su análisis. En la actualidad existen programas específicos dedicados al análisis de miles de sistemas o fenómenos reales.
- **Verificación:** En este paso se verifica que no existan errores durante la captura del modelo de simulación y se corrobora que el modelo describe al sistema real.
- **Validación:** En esta etapa se comprueba que el modelo es exacto en las predicciones que arroja por medio de su comparación con los datos históricos o los datos recolectados. En este punto puede ser necesario afinar el modelo o incrementar la cantidad de datos recolectados.

- Experimentación: Se prueba el modelo bajo los escenarios propuestos para la solución del problema en cuestión.
- Interpretación: Se estudian los resultados obtenidos de la simulación de los escenarios y se concluye si mediante estos se alcanzan los objetivos deseados.
- Implementación: Si los resultados son satisfactorios, las medidas propuestas pueden ser ejecutadas sobre el sistema real. El analista debe estar al tanto de la correcta implementación de las medidas, a fin de garantizar que los resultados obtenidos en el modelo de simulación son replicados en la realidad.
- Documentación: Es aconsejable documentar el proceso de la simulación, con todos los detalles del modelo, de los datos utilizados, las fallas presentadas, los cambios realizados durante el proceso, las soluciones propuestas y los resultados, con el fin de mejorar o facilitar el modelo si es requerido.

2.4.4 Simulación de tráfico

En la última década la simulación de tráfico ha llegado a utilizarse en la mayoría de los estudios e investigaciones de tránsito urbano debido a los beneficios que reporta, ya que de principio ayuda a obtener un mayor conocimiento de la situación general del tráfico en las ciudades (PÉREZ, 2005).

Además, la simulación del tráfico ofrece la oportunidad de dar soluciones a los problemas encontrados y facilita la comprensión de cómo podría afectar la realización de ciertas modificaciones en la organización y operación del tráfico urbano, como por ejemplo, al proponer la variación de tiempo de permanencia del rojo en ciertos semáforos con el fin de que las colas que se produzcan sean mínimas.

Ahora bien, de acuerdo a los objetivos planteados del análisis o de la investigación, se pueden generar modelos de simulación microscópica o macroscópica.

Los primeros se caracterizan por describir con gran nivel de detalle el comportamiento de los vehículos que circulan en la red de viales, para ello, estos modelos requieren describir exhaustivamente el entorno, como la geometría de los carriles, la posición de semáforos, la existencia de topes, retornos, entre otros; además requieren la descripción a gran detalle del comportamiento de los vehículos y sus características de tamaño, velocidad, etc. Por estas razones los programas de simulación microscópica resultan ser muy costosos de desarrollar y mantener en comparación con otros tipos de modelos (PÉREZ, 2005).

Por su parte, los modelos macroscópicos describen con menor detalle a los sistemas de transporte, puesto que modelan espacios geográficos más amplios que los modelos

microscópicos, por lo que ayudan a diseñar nuevas vialidades, a implementar nuevos modos de transporte, nuevas rutas, a generar y establecer nuevas políticas públicas y de transporte enfocadas a ayudar a la movilidad general de las ciudades, aunque no tienen la capacidad de simular el comportamiento de los vehículos en intersecciones específicas y por lo tanto no ayudan a establecer los tiempos óptimos de semáforos (PÉREZ, 2005).

El presente trabajo se centra en la simulación de modelos microscópicos puesto que el objetivo es modelar las condiciones de tránsito existentes en las intersecciones seleccionadas, para así poder optimizar los tiempos de operación de los semáforos.

3 Estrategia de trabajo

El establecimiento de la estrategia de trabajo está basado en las etapas de simulación descritas anteriormente en la sección 2.4.3. A continuación se detalla cada una de ellas para el caso de estudio en cuestión.

3.1 Formulación del problema y delimitación del sistema

Como se describió en un principio, múltiples vialidades e intersecciones de la Ciudad de México, presentan problemas de congestión, por ello el objetivo planteado es evaluar distintos escenarios de operación de los semáforos, utilizando software especializado en tránsito, con el fin de mejorar la circulación de la zona y ayudar a reducir la congestión vehicular y mitigar algunos de sus efectos negativos.

El caso de estudio seleccionado está conformado por la intersección de la lateral de Periférico con Calzada de Tlalpan (Intersección 1), la intersección de la lateral de Periférico con Renato Leduc (Intersección 2), y La intersección formada del cruce de Renato Leduc con Calzada de Tlalpan (Intersección 3). En la siguiente *Figura 3.1* se muestran las intersecciones a modelar.



Figura 3.1 Intersecciones de estudio

Fuente: Elaboración propia basada en imagen extraída de Google Maps (2015).

3.2 Colección de datos y formulación del modelo

Los aspectos relevantes para modelar la zona de estudio se pueden distinguir en tres categorías: características geométricas, características del tránsito y características de operación de los semáforos.

En estos tres aspectos es necesario entonces realizar la captura de ciertos parámetros específicos. A continuación se exponen en qué consisten y cuál fue su forma de obtención.

a) Características geométricas:

Dentro de este rubro es necesario recabar la información siguiente:

- Anchos de carril.
- Número de carriles.
- Sentidos de circulación.
- Vueltas permitidas.

Esta información se recopiló mediante la medición manual en sitio y mediante la ayuda de las vistas satelitales de la zona y las vistas de calle provistas por Google Maps.

Se obtuvieron los siguientes resultados:

Ancho y número de carriles en Intersección 1:

- Tlalpan: 3.8 metros, 2 carriles.
- Lateral de Periférico: 3.3 metros, 2 carriles.

Ancho y número de carriles en Intersección 2:

- Renato Leduc: 3.6 metros, 2 y 3 carriles.
- Lateral de Periférico: 3.3 metros, 2 carriles.

Ancho y número de carriles en Intersección 3:

- Tlalpan: 3.3 metros, 4 carriles hacia el norte y 5 hacia el sur.
- Retorno Tlalpan: 3.6 metros, 4 carriles.
- Desviación de Tlalpan a Calzada Xochimilco: 3.4 metros, 2 carriles.
- Renato Leduc: 3.6 m, 3 y 2 carriles.

En cuanto a los sentidos de circulación y vueltas permitidas, las *Figuras 3.2, 3.3 y 3.4* muestran dicha información para la Intersección 1, la Intersección 2 y la Intersección 3 respectivamente.

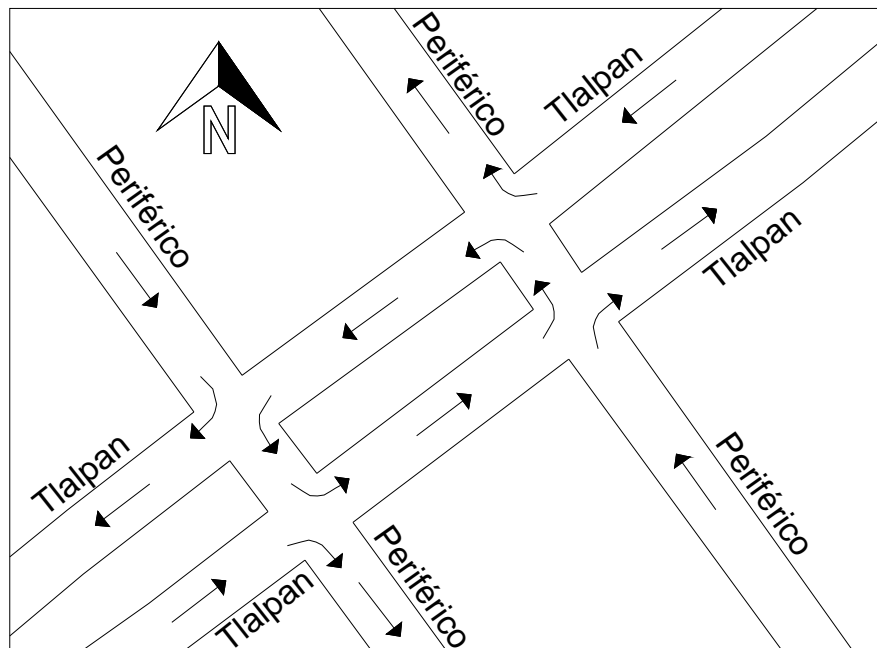


Figura 3.2 Intersección 1 - Sentidos de circulación

Fuente: Elaboración propia

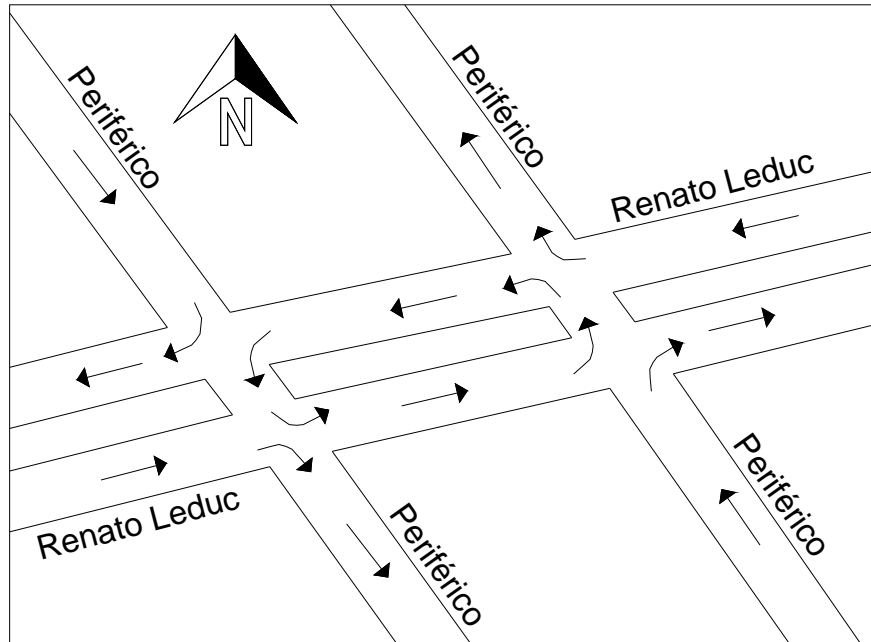


Figura 3.3 Intersección 2 - Sentidos de circulación
Fuente: Elaboración propia

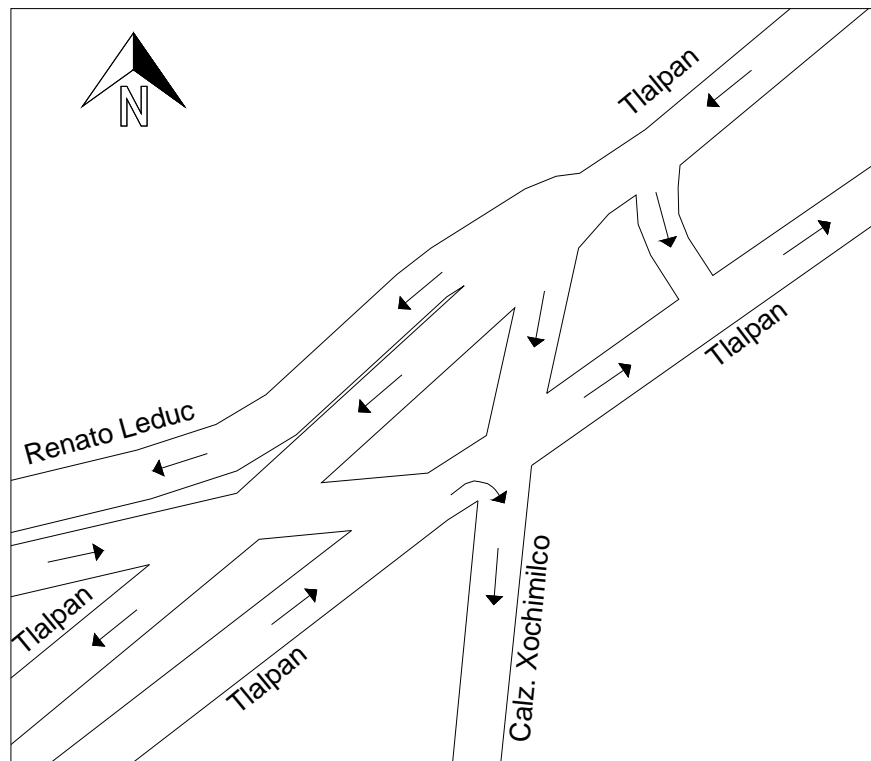


Figura 3.4 Intersección 3 - Sentidos de circulación
Fuente: Elaboración propia

b) Características del tránsito:

En este ámbito se requiere la siguiente información:

- Volumen Horario Promedio (VPH):

La cantidad de vehículos que circulan en promedio cada hora en las avenidas del caso de estudio.

- Bloqueos de autobuses

En la Ciudad de México es común que el transporte público espere cierto tiempo antes de cruzar la intersección para subir a una mayor cantidad de personas. Para la realización del modelo se midieron la cantidad de microbuses que paran antes de cruzar en el periodo de tiempo de una hora.

Ambos parámetros se obtuvieron mediante la captura de videos para posteriormente realizar los conteos vehiculares por segmentos de tiempo de 5 minutos y por tipo de vehículo, siendo la clasificación de 2 tipos:

- Vehículos Tipo A: Automóviles particulares y taxis
- Vehículo Tipo B: Transporte de carga y de pasajeros de grandes dimensiones (colectivos, autobuses).

En las *Figuras 3.5, 3.6 y 3.7* se muestra una captura de pantalla del aforo vehicular realizado en cada una de las intersecciones.



Figura 3.5 Aforo en Intersección 1

Fuente: Elaboración propia



Figura 3.6 Aforo en Intersección 2
Fuente: Elaboración propia



Figura 3.7 Aforo en Intersección 3
Fuente: Elaboración propia

También a partir de estas grabaciones, se diseñó un diagrama de volúmenes de tránsito direccionales, para poder llevar un orden en los conteos de vehículos. Se enumeran los flujos que siguen derecho, los que giran a la derecha o a la izquierda.

Cabe destacar que la clasificación de vehículos tipo A y tipo B se muestra en términos de porcentaje, es decir, que si por ejemplo se muestra que el porcentaje de vehículos tipo A es de 83%, quiere decir que del volumen promedio por hora (VPH) medido, el 83% corresponde a vehículos particulares y taxis, mientras que el restante 17% corresponde a vehículos tipo B (camiones de pasajeros y de carga).

De esta forma en las *Figuras 3.8* se muestran los diagramas de movimientos direccionales de la intersección 1.

En la *Figura 3.9* se muestran los correspondientes conteos vehiculares clasificados y la cantidad de bloqueos de autobuses por hora.

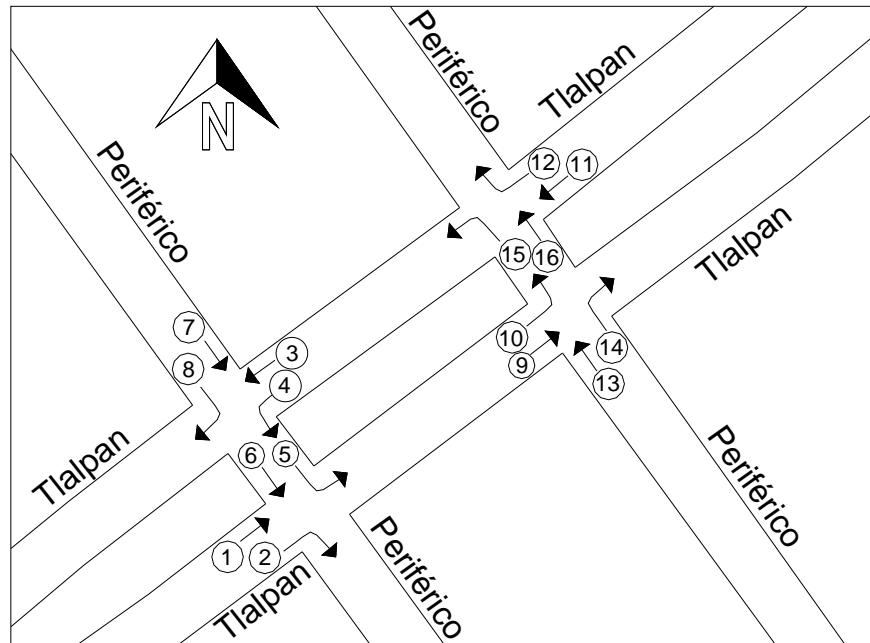


Figura 3.8 Diagrama de movimientos direccionales – Intersección 1

Fuente: Elaboración propia

Movimiento	VPH	%A	%B	Bloqueos de autobuses por hora
1	840	75%	25%	12
2	84	100%	0%	0
3	744	75%	25%	0
4	162	100%	0%	0
5	156	100%	0%	0
6	528	79%	21%	0
7	522	79%	21%	6
8	102	100%	0%	0
9	738	72%	28%	0
10	258	100%	0%	0
11	633	70%	30%	12
12	78	100%	0%	0
13	609	83%	17%	12
14	93	100%	0%	0
15	273	100%	0%	0
16	594	83%	17%	0

Figura 3.9 Volúmenes promedio horario – Intersección 1

Fuente: Elaboración propia

Para la Intersección 2, las Figuras 3.10 y 3.11 muestran los conteos respectivos.

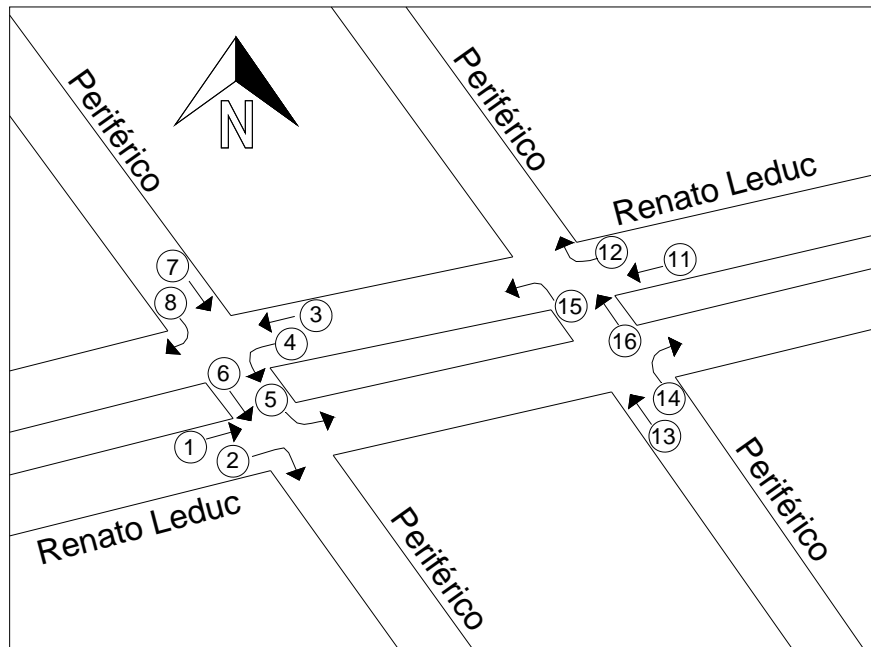


Figura 3.10 Diagrama de movimientos direccionales – Intersección 2

Fuente: Elaboración propia

Movimiento	VPH	%A	%B	Bloqueos de autobuses por hora
1	1242	95%	5%	1
2	129	100%	0%	0
3	795	97%	3%	0
4	57	100%	0%	0
5	222	100%	0%	0
6	504	75%	25%	0
7	669	81%	19%	4
8	21	100%	0%	0
9	744	92%	8%	0
10	720	100%	0%	0
11	678	97%	3%	6
12	369	100%	0%	0
13	690	91%	9%	8
14	48	100%	0%	0
15	174	100%	0%	0
16	1236	95%	5%	0

Figura 3.11 Volúmenes promedio horario – Intersección 2

Fuente: Elaboración propia

Para la Intersección 3, las Figuras 3.12 y 3.13 muestran los conteos respectivos.

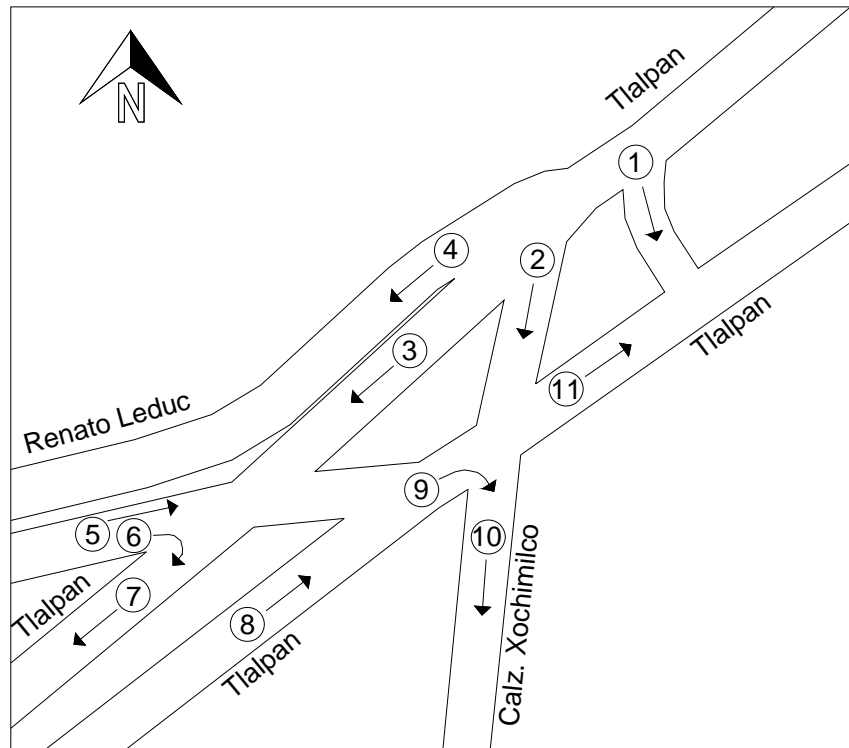


Figura 3.12 Diagrama de movimientos direccionales – Intersección 3
Fuente: Elaboración propia

Movimiento	VPH	%A	%B	Bloqueos de autobuses por hora
1	1160	89%	11%	0
2	476	77%	23%	0
3	648	76%	24%	0
4	1212	96%	4%	0
5	852	91%	9%	0
6	20	100%	0%	0
7	668	77%	23%	0
8	616	69%	31%	12
9	88	100%	0%	0
10	564	81%	19%	0
11	1468	82%	18%	0

Figura 3.13 Volúmenes promedio horario – Intersección 3
Fuente: Elaboración propia

c) Características de la operación de los semáforos:

Finalmente en este aspecto se requiere la información de los tiempos de verde, amarillo y rojo, así como las fases o movimientos permitidos dentro del ciclo total de operación.

Es de destacar que, como se ha mencionado en la introducción, los semáforos que regulan el tránsito en la zona de estudio son de tipo estático ó fijo, es decir, no existe ningún tipo de contador que permita la captura de los flujos en tiempo real, ni están interconectados a un mando central, por lo que los tiempos de verde, amarillo y rojo están pre-establecidos y no varían a lo largo del día.

Ahora bien, en las Intersecciones 1 y 2, los movimientos están controlados principalmente por semáforos ubicados en los accesos a la intersección. En la *Figura 3.14* se muestran los semáforos que existen en ambas intersecciones, con arreglos idénticos.

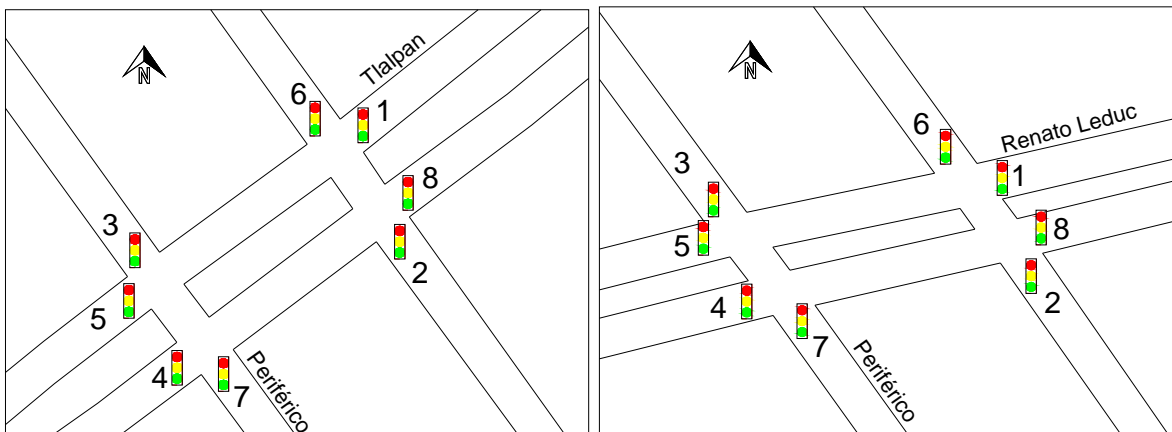


Figura 3.14 Semáforos en Intersección 1 y 2

Fuente: Elaboración propia

Los tiempos de semáforo de ambas intersecciones se presentan en las *Figuras 3.15* y *3.16*. La información se presenta en segundos y se calcula además el tiempo total de ciclo, es decir, el periodo en que se realizan todos los movimientos permitidos.

Tiempos de semáforo (s)				Tiempo total de ciclo (s)
Semáforo	Verde	Amarillo	Rojo	
1	45	3	80	128
2	45	3	80	128
3	45	3	80	128
4	55	3	70	128
5	45	3	80	128
6	45	3	80	128
7	45	3	80	128
8	55	3	70	128

Figura 3.15 Tiempos de semáforo en Intersección 1

Fuente: Elaboración propia

Tiempos de semáforo (s)				Tiempo total de ciclo (s)
Semáforo	Verde	Amarillo	Rojo	
1	55	3	70	128
2	40	3	85	128
3	40	3	85	128
4	55	3	70	128
5	55	3	70	128
6	40	3	85	128
7	40	3	85	128
8	55	3	70	128

Figura 3.16 Tiempos de semáforo en Intersección 2

Fuente: Elaboración propia

Estos tiempos de semáforo están distribuidos y coordinados entre sí, de la manera en que se muestra en la *Figura 3.17* y *3.18* para las intersecciones 1 y 2 respectivamente.

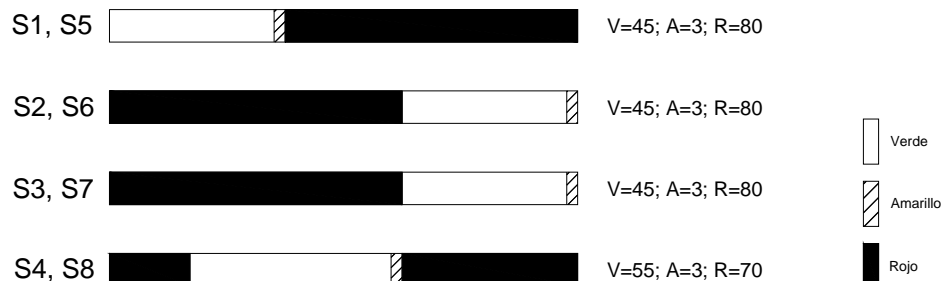


Figura 3.17 Distribución de los tiempos de semáforo en Intersección 1

Fuente: Elaboración propia

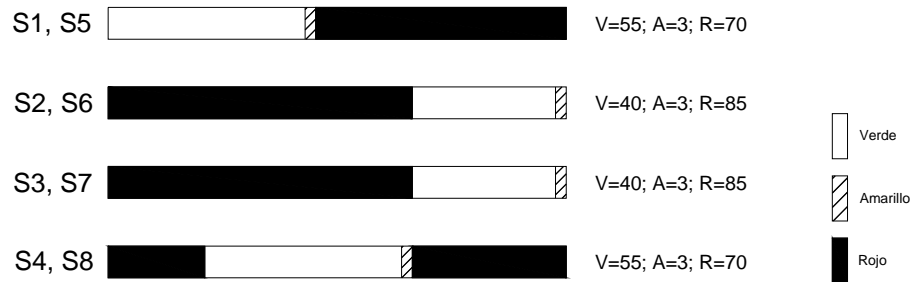


Figura 3.18 Distribución de los tiempos de semáforo en Intersección 2
Fuente: Elaboración propia

En el caso de la intersección 3, encontramos que el tráfico vehicular está coordinado por 5 semáforos mostrados en la *Figura 3.19*. Los tiempos de semáforo y la distribución de los tiempos, se muestran en las *Figuras 3.20 y 3.21*.

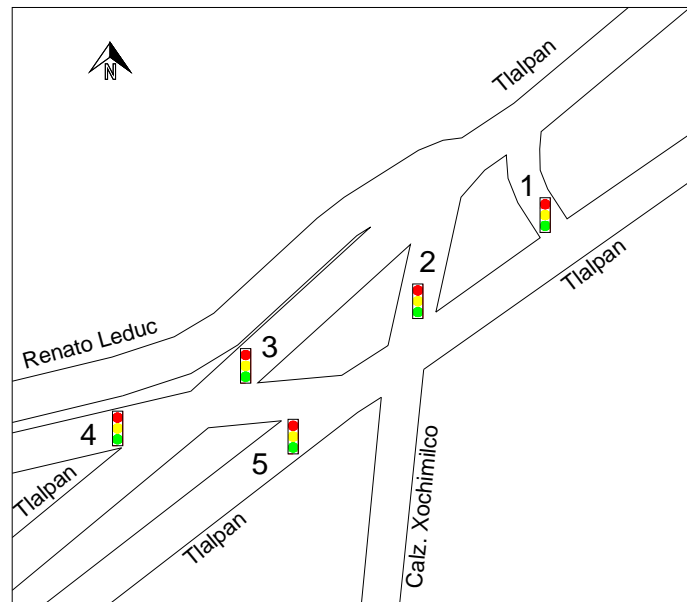


Figura 3.19 Semáforos en Intersección 3
Fuente: Elaboración propia

Semáforo	Tiempos de semáforo (s)			Tiempo total de ciclo (s)
	Verde	Amarillo	Rojo	
1	55	3	70	128
2	45	3	80	128
3	40	3	85	128
4	30	3	95	128
5	40	3	85	128

Figura 3.20 Tiempos de semáforos en Intersección 2

Fuente: Elaboración propia

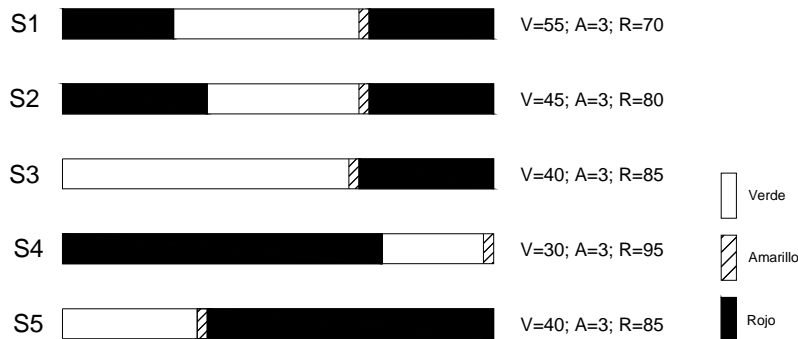


Figura 3.21 Distribución de los tiempos de semáforo en Intersección 3

Fuente: Elaboración propia

En cuanto a los movimientos permitidos, se puede mencionar que en las tres intersecciones los semáforos presentan cuatro fases dentro del ciclo de operación.

Las intersecciones 1 y 2 presentan fases idénticas. En la *Figura 3.22* y *3.23*, se presentan cada una de dichas fases. Observamos en la imagen que la Fase 1 se permite únicamente el movimiento del flujo de Tlalpan en un sentido y le permite la incorporación hacia la lateral de Periférico. En la Fase 2, se permite los movimientos de los flujos por Tlalpan por igual, en seguida la Fase 3 limita el movimiento de la Fase 1 y permite los flujos provenientes de Tlalpan (en la dirección opuesta) y permite su incorporación hacia la lateral de Periférico. Finalmente la Fase 4 permite los movimientos simultáneos de la lateral de Periférico.

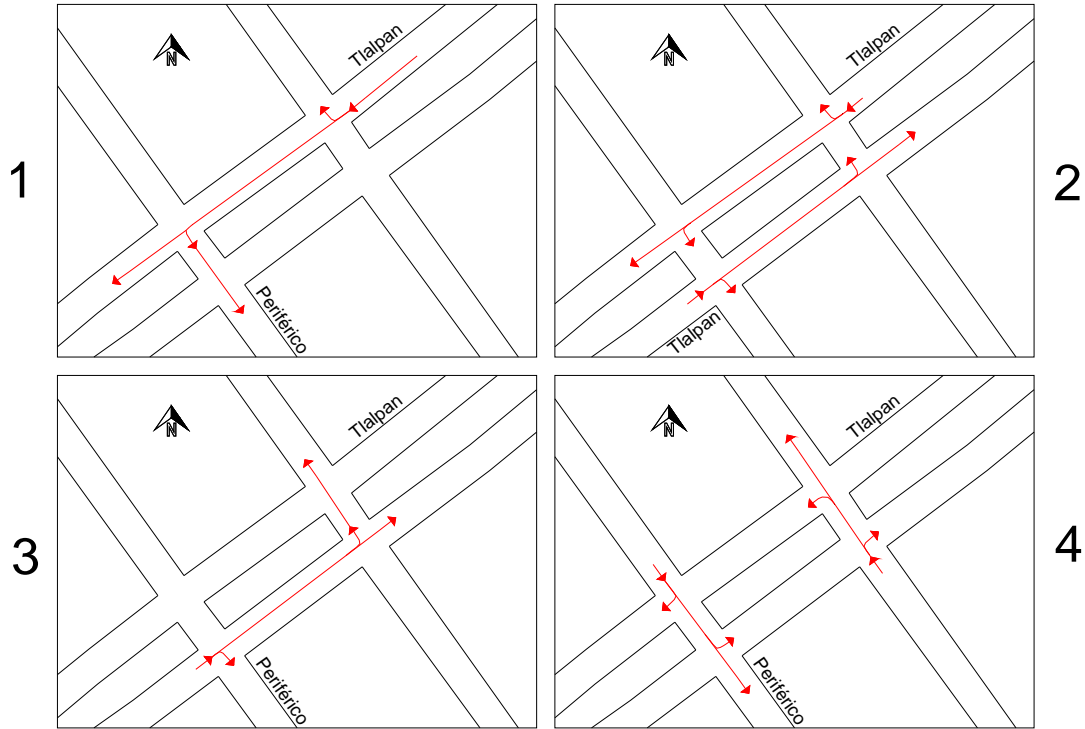


Figura 3.22 Fases permitidas en la Intersección 1
Fuente: Elaboración propia

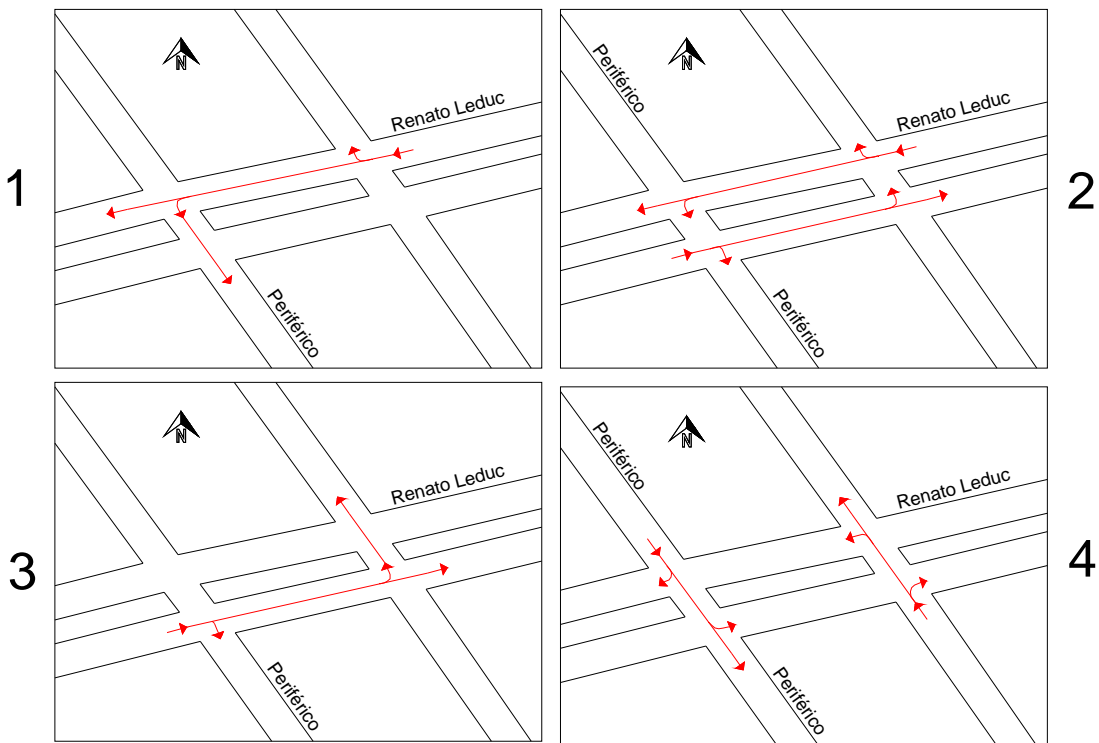


Figura 3.23 Fases en Intersección 2
Fuente: Elaboración propia

En cuanto a la Intersección 3, se presentan igualmente 4 fases dentro del ciclo de operación. En la *Figura 3.24* se muestra que en la primera fase se permite los movimientos de los vehículos provenientes de Tlalpan hacia el sur y que siguen sobre Tlalpan y se permiten que los vehículos tomen Renato Leduc y/o Calzada Xochimilco. En la Fase 2 se limita el paso del flujo que sigue sobre Tlalpan. En la Fase 3 se permite el movimiento de los vehículos de Renato Leduc del sur hacia el norte. Finalmente en la Fase 4 se permite el flujo proveniente del sur de Tlalpan hacia el norte y hacia el sur.

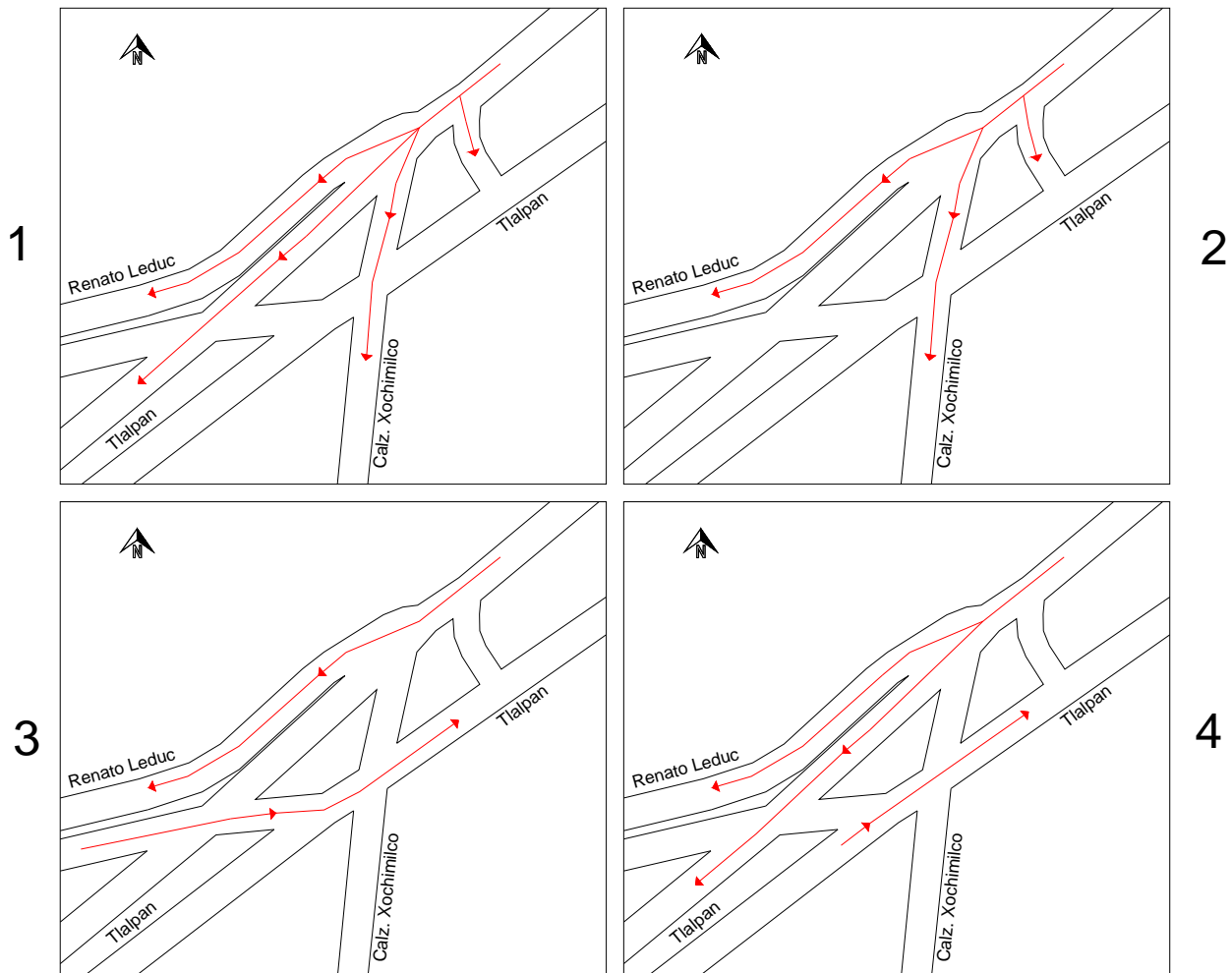


Figura 3.24 Fases en Intersección 3

Fuente: Elaboración propia

3.3 Implementación del modelo en la computadora

Se seleccionó el programa Synchro para modelar la zona de estudio, ya que es ampliamente utilizado para la planeación, diseño, control y optimización de tiempos de semáforo en intersecciones y arterias viales (TRAFFICWARE, 2011).

Dentro de las principales funciones de Synchro encontramos las siguientes:

- Análisis de capacidad en intersecciones sin semáforos siguiendo la metodología del Highway Capacity Manual (HCM).
- Análisis de capacidad en intersecciones semaforizadas siguiendo la metodología del Highway Capacity Manual (HCM).
- Optimización de longitudes de ciclo y tiempos de fase.
- Coordinación de semáforos generando planes de tiempo optimizando fases, longitudes de ciclo y desplazamientos, generando diagramas tiempo-espacio.
- Modelado y simulación microscópica del tráfico de una intersección.
- Animación de la modelación y simulación de movimientos vehiculares.
- Capacidad de trabajar con semáforos de tiempo fijo y de tiempo variable.
- Puede generar reportes de forma automática.

Es importante destacar que las funciones de la animación de la modelación y la simulación de movimientos, se realiza por medio del modulo SimTraffic que viene integrado dentro de Synchro.

De esta manera, la optimización de los tiempos de semáforos se realiza mediante Synchro y la simulación del tráfico mediante SimTraffic.

Una vez dentro del programa, se introducen las características geométricas, las características de los flujos vehiculares y las características de la operación de los semáforos.

El primer paso se realiza con la ayuda de una imagen satelital de referencia que se utiliza para trazar las vialidades mediante los elementos líneas (que representan vialidades) y nodos (que representan las intersecciones). En las *Figuras 3.25, 3.26 y 3.27* se muestran las vialidades e intersecciones creadas.

Para poder identificar a cada nodo, se enumeró cada uno de ellos comenzando por la Intersección 1. Se crearon y enumeraron un total de 14 nodos, de los cuales solamente los 11 primeros se analizarán a detalle puesto que en los nodos 12, 13 y 14 no existe semáforo que regule el tránsito.

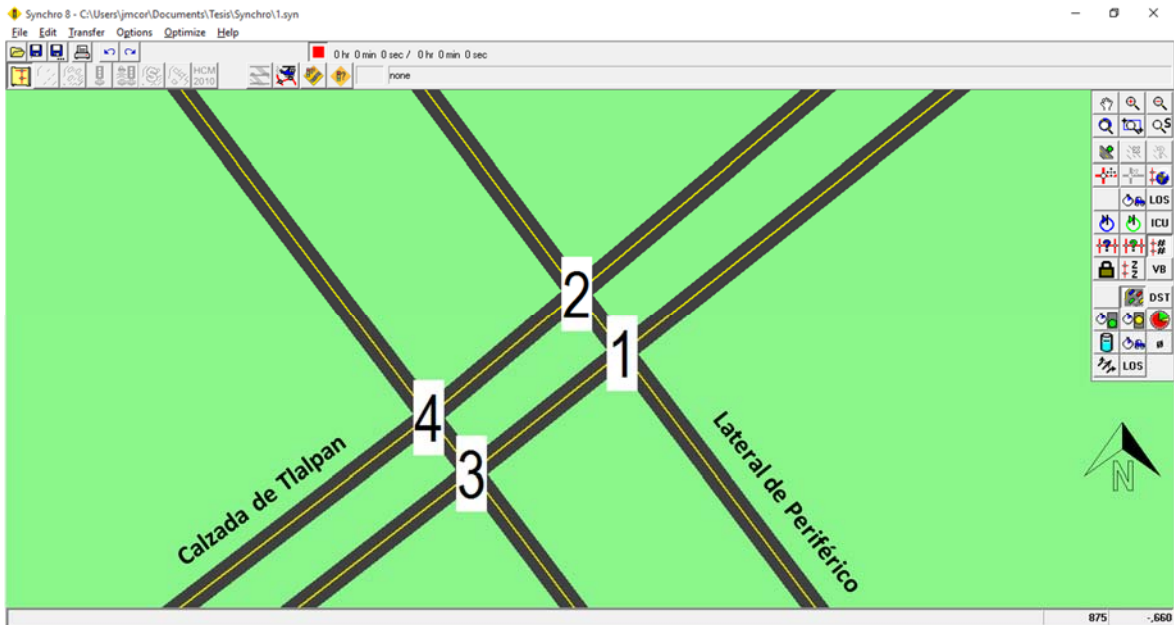


Figura 3.25 Nodos creados en la Intersección 1

Fuente: Elaboración propia basada en imagen del espacio de trabajo en Synchro

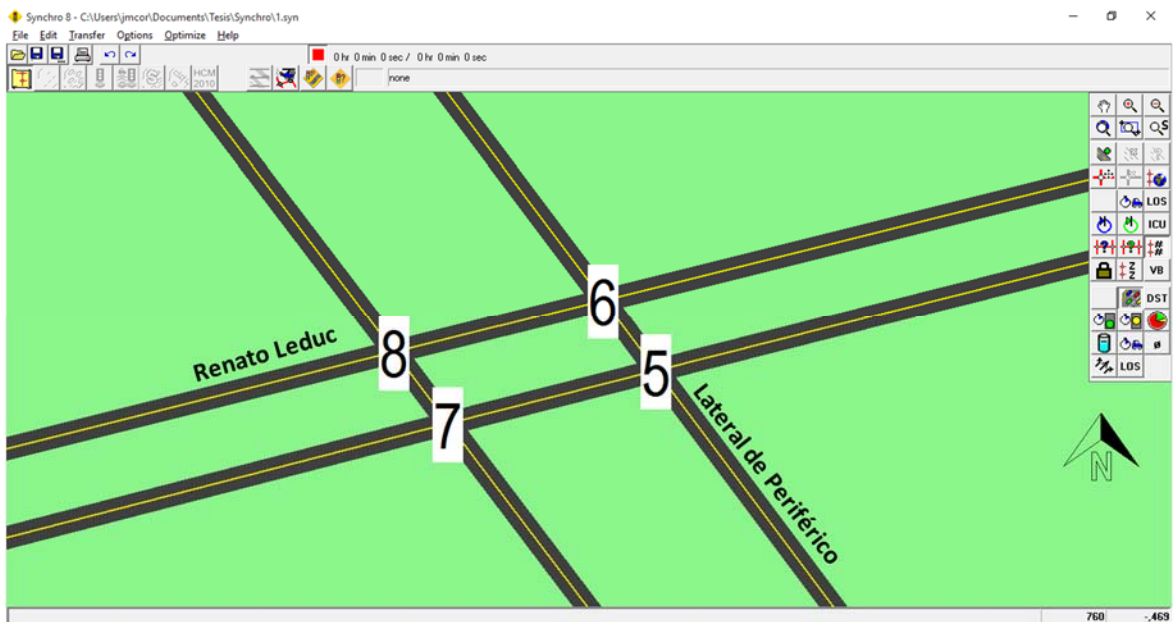


Figura 3.26 Nodos creados en la Intersección 2

Fuente: Elaboración propia basada en imagen del espacio de trabajo en Synchro

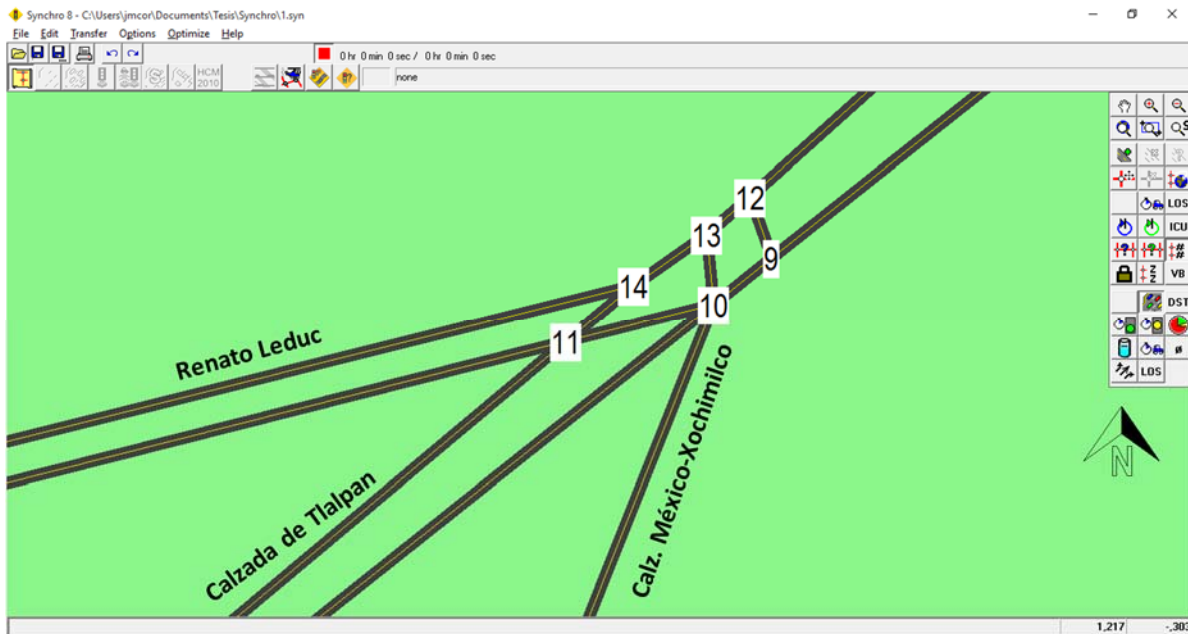


Figura 3.27 Nodos creados en la Intersección 3

Fuente: Elaboración propia basada en imagen del espacio de trabajo en Synchro

Se introducen en el programa las demás características de ancho de carril, número de carriles, sentidos de circulación y vueltas permitidas. Las Figuras 3.28, 3.29 y 3.30, muestran la alimentación del modelo con esta información.

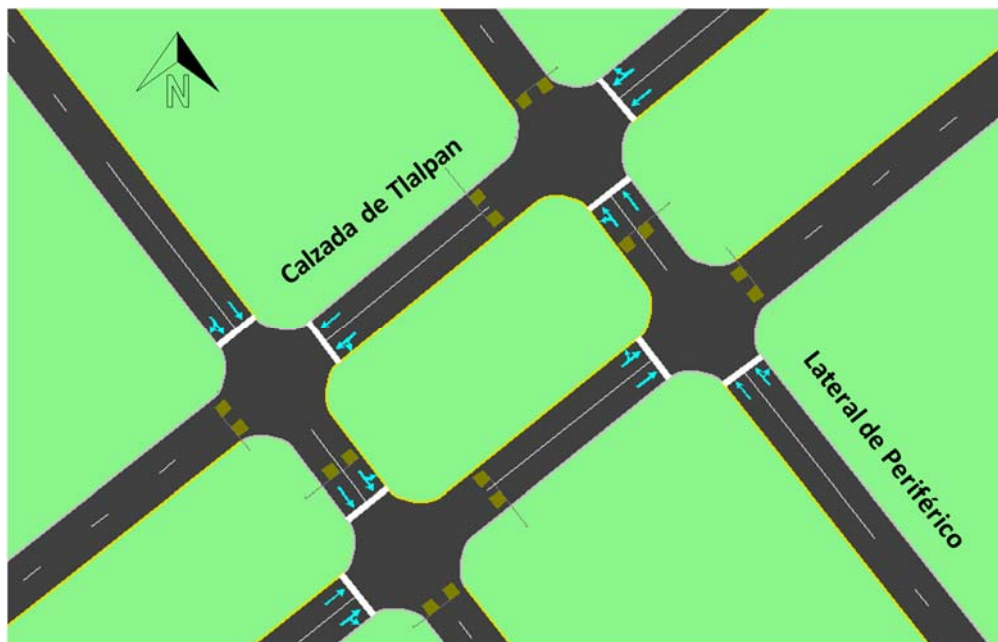


Figura 3.28 Modelo de Intersección 1

Fuente: Elaboración propia basada en imagen del espacio de trabajo en Synchro

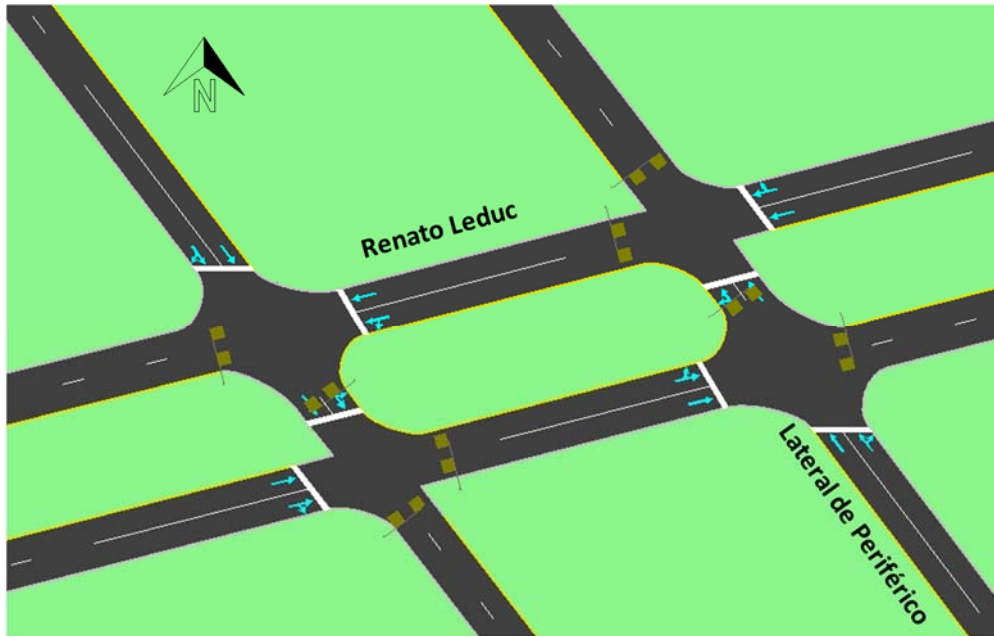


Figura 3.29 Modelo de Intersección 2

Fuente: Elaboración propia basada en imagen del espacio de trabajo en Synchro



Figura 3.30 Modelo de Intersección 3

Fuente: Elaboración propia basada en imagen del espacio de trabajo en Synchro

Las características del flujo vehicular y de la operación de los semáforos se introducen para terminar de modelar la zona de estudio. Ejemplos de la modelación se muestran en Las *Figuras 3.31 y 3.32*, donde se alcanza a observar los semáforos y los flujos vehiculares de la zona de estudio.



Figura 3.31 Vista en 3D de los flujos vehiculares de la Intersección 3
Fuente: 3D Viewer, SimTraffic



Figura 3.32 Vista en 3D de los flujos vehiculares de la Intersección 3
Fuente: 3D Viewer, SimTraffic

Una vez concluidas estas etapas, en el capítulo siguiente se discuten los resultados obtenidos a partir del uso de Synchro, y que incluye la etapa de verificación y validación del modelo de la zona de estudio.

4 Resultados

4.1 Análisis del estado actual de la zona de estudio

Una vez que se han representadas las intersecciones en Synchro, es posible obtener algunos indicadores iniciales de referencia que nos permitirán comparar el funcionamiento actual de los sistemas semafóricos con los escenarios que se proponen en la siguiente sección.

Ahora bien, los principales indicadores que se extraerán de Synchro a fin de comparar el estado actual con los escenarios propuestos, saber serán las demoras (tiempo en que tarda un vehículo en atravesar la intersección), el nivel de servicio (LOS) de la intersección y el nivel de servicio de la utilización de la capacidad de la intersección (ICU LOS).

Debe mencionarse que la diferencia entre los dos niveles de servicio a analizar es que el primer parámetro está directamente relacionado con las demoras que se generan en la intersección y el ICU LOS es una medida que Synchro proporciona para medir cómo funciona la intersección en referencia a la capacidad aprovechada y la capacidad extra que puede manejar (Trafficware, 2011).

En la siguiente *Figura 4.1* se observa el criterio de asignación del nivel de servicio a partir de las demoras de acuerdo a lo establecido en el Highway Capacity Manual (Manual de Capacidad de Carreteras). Cabe destacar que las unidades del valor de las demoras esta en segundos.

Demora (s)	LOS
Menor a 10	A
Entre 10 y 15	B
Entre 15 y 25	C
Entre 25 y 35	D
Entre 35 y 50	E
Mayor a 50	F

Figura 4.1 Nivel de servicio a partir de las demoras (HCM 2010)

Fuente: Elaboración propia basada en el Manual de Usuario de Synchro, página 4-10.

En la *Figura 4.2* se observa el criterio de asignación del nivel de servicio a partir de la utilización de la capacidad de la intersección. Este nivel de servicio es establecido por Synchro. En este caso la utilización de la capacidad de la intersección no tiene unidades puesto que el valor muestra cuanta capacidad de la intersección está siendo ocupada.

ICU	ICU LOS
0 a 0.55	A
0.55 a 0.64	B
0.64 a 0.73	C
0.73 a 0.82	D
0.82 a 0.91	E
0.91 a 1	F
1 a 1.09	G
Mayor a 1.09	H

Figura 4.2 Nivel de servicio de la utilización de la capacidad de la intersección

Fuente: Elaboración propia basada en el Manual de Usuario de Synchro, página 4-12.

Una vez expuestos los criterios de asignación de los niveles de servicio, en la *Figura 4.3* se muestra un cuadro resumen de la información del reporte de Synchro con las demoras y la utilización de la capacidad (ICU) para cada uno de los nodos que conforman las intersecciones analizadas.

En esta tabla se puede observar que los niveles de servicio de acuerdo al HCM son malos para la mayoría de los nodos que conforman las intersecciones analizadas, al presentarse valores de C, hasta F.

En el caso de la utilización de la capacidad (ICU), también se encuentran valores malos en casi todos los nodos, lo que significa que las intersecciones cuentan con poca capacidad extra si se elevaran en el futuro los flujos vehiculares en la zona de estudio. Hay que aclarar que para el nodo 1 (por mencionar un ejemplo), el ICU tiene un valor de 0.72, lo que significa que la intersección está a 72% de su capacidad, por lo que sólo tiene un 28% de capacidad disponible.

Intersección	Nodo	Demoras (s)	LOS	ICU	ICU LOS
1	1	117	F	0.72	C
	2	176	F	0.77	D
	3	33	C	0.69	C
	4	141	F	0.75	D
2	5	63	E	0.85	E
	6	247	F	1.02	G
	7	24	C	0.71	C
	8	52	D	0.75	D
3	9	37	D	0.73	D
	10	217	F	0.55	B
	11	23	C	0.46	A

Figura 4.3 Tabla resumen de parámetros del estado actual de la zona de estudio

Fuente: Elaboración propia

Una vez conocidos estos datos y antes de avanzar hacia los escenarios propuestos, es necesario realizar la verificación del modelo, que se llevó a cabo mediante la comparación de las colas medidas en sitio con las resultantes de la simulación (Con el módulo de Synchro: SimTraffic). Además se comparará el tiempo de las demoras de los vehículos en las intersecciones analizadas.

En la Figura 4.4 se muestra la comparativa de las longitudes de la cola medidas en campo con las formadas en la simulación con SimTraffic. Puede observarse una variación de entre el 9 y 13% por lo que puede considerarse aceptable para poder probar las propuestas del siguiente capítulo.

Intersección	Avenida /Sentido de circulación	Longitud de cola en sitio (metros)	Longitud de cola simulada (metros)	Porcentaje de variación
1	Periférico / Oriente-Poniente	85	78	9%
	Periférico / Poniente-Oriente	110	124	12%
	Tlalpan / Norte-Sur	90	101	11%
	Tlalpan / Sur-Norte	98	113	13%
2	Periférico / Oriente-Poniente	50	43	16%
	Periférico / Poniente-Oriente	75	68	10%
	Renato Leduc / Norte-Sur	60	68	12%
	Renato Leduc / Sur-Norte	150	135	11%
3	Calzada de Tlalpan / Norte-Sur	120	131	8%
	Calzada de Tlalpan / Sur-Norte	88	101	13%
	Renato Leduc / Sur-Norte	50	55	9%

Figura 4.4 Longitud de colas de la zona de estudio

Fuente: Elaboración propia

Por su parte la Figura 4.5 muestra los tiempos que demora un vehículo en cruzar la intersección. Para este caso los porcentajes de variación van del 11% hasta el 18% siendo este valor el que pudiera no considerarse adecuado.

Intersección	Nodo	Demora medida (s)	Demora en Synchro (s)	Porcentaje de variación
1	1	105	117	11%
	2	197	176	11%
	3	40	33	17%
	4	166	141	15%
2	5	70	63	10%
	6	210	247	18%
	7	28	24	13%
	8	59	52	12%
3	9	41	37	8%
	10	184	217	18%
	11	25	23	9%

Figura 4.5 Demoras en las intersecciones

Fuente: Elaboración propia

Considerado aceptables los valores arrojados por Synchro del estado actual de la zona de estudio, se propusieron 3 escenarios para bajar los tiempos de demora y mejorar los niveles de servicio de las intersecciones y por tanto, mejorar la circulación vehicular de la red de intersecciones modelada. A continuación se describe y se analiza cada uno de los escenarios propuestos.

4.2 Escenarios propuestos

Antes de exponer las propuestas, es importante aclarar que los parámetros que cambiarán en dichos escenarios, serán únicamente las características de operación de los semáforos, es decir, el tiempo total de ciclo y sus componentes, a saber, los tiempos de verde, amarillo y rojo. Las características geométricas y las características de los flujos vehiculares permanecerán constantes.

4.2.1 Escenario 1

En el primer escenario se propone la optimización de los tiempos de verde, amarillo y rojo de los semáforos del caso de estudio. Como se ha comentado, permanecen constantes las características geométricas y de los flujos vehiculares (volúmenes promedio horarios). También permanecen constantes los movimientos permitidos (fases), tal como opera actualmente.

Bajo estas condiciones, Synchro optimizó la longitud de ciclo de las intersecciones, con una leve mejoría en los niveles de servicio. Synchro encontró óptimo el valor de 150 segundos de tiempo total de ciclo de operación, para todos los semáforos de las tres intersecciones en conjunto.

En la *Figura 4.6* se plasman las iteraciones realizadas por el programa para encontrar el valor óptimo. Se puede observar que para una longitud de ciclo de operación de los semáforos de 150 segundos, se obtiene el menor tiempo de demora (Total Delay).

Los niveles de servicio y los valores de utilización de la capacidad (ICU) se muestran en la *Figura 4.7*. Puede observarse que bajo la longitud de ciclo de 150 segundos, se mejoran 6 valores de nivel de servicio, es decir, se redujeron las demoras en 6 nodos de las intersecciones. Las mejorías se presentan principalmente en la Intersección 3, es decir en el cruce de Tlalpan con Renato Leduc y la Calzada México Xochimilco.

En relación al ICU, los valores se mantienen igual con la nueva programación de tiempos de semáforos. Por lo que las intersecciones siguen presentando los mismos niveles de capacidad que en el estado actual.

Cycle Length	Perform Index	Block Delay (hr)	Total Delay (hr)	Delay / Veh (s)	Total Stops	Stops / Veh	Fuel (l)	Unservd Vehicles	Dilemma Vehicles	% Dilemma Vehicles	Average Spd (km/hr)
50	666	400	623	107	15401	0.74	2420	143	0	0%	5
55	667	400	624	108	15370	0.74	2422	143	0	0%	5
60	668	400	625	108	15352	0.73	2425	143	0	0%	5
65	565	288	526	91	14029	0.67	2146	255	0	0%	6
70	531	268	492	85	13833	0.66	2051	153	0	0%	6
75	842	392	806	139	13003	0.62	2917	1402	0	0%	5
80	756	382	719	124	13042	0.62	2677	1060	0	0%	5
85	620	293	586	101	12390	0.59	2305	810	0	0%	6
90	550	247	514	89	12999	0.62	2109	662	0	0%	6
95	541	261	507	87	12344	0.59	2086	590	0	0%	6
100	486	214	450	78	13025	0.62	1931	527	0	0%	7
105	466	205	429	74	13275	0.64	1874	472	0	0%	7
110	433	183	396	68	13051	0.62	1782	418	0	0%	7
115	429	186	393	68	12957	0.62	1773	372	0	0%	7
120	428	189	391	67	13354	0.64	1769	328	0	0%	7
125	408	175	372	64	12829	0.61	1715	286	0	0%	8
130	413	178	375	65	13792	0.66	1726	252	0	0%	8
135	404	173	365	63	13971	0.67	1699	217	0	0%	8
140	408	178	371	64	13317	0.64	1713	185	0	0%	8
145	406	175	367	63	14047	0.67	1705	155	0	0%	8
150	401	172	366	63	12702	0.61	1696	128	0	0%	8

Zone: (all) Cycle Length: 150
 Number of intersections: 11
 Uncoordinated: 1
 Half Cycled: 0
 Locked Other: 0

OK Cancel

Figura 4.6 Iteraciones para la optimización de la longitud ciclo

Fuente: Reporte de Synchro

Intersección	Nodo	Demoras (s)	LOS	ICU	ICU LOS
1	1	173	F	0.72	C
	2	60	E	0.77	D
	3	36	D	0.69	C
	4	57	E	0.75	D
2	5	24	C	0.85	E
	6	159	F	1.02	G
	7	30	C	0.71	C
	8	59	E	0.75	D
3	9	24	C	0.73	D
	10	12	B	0.55	B
	11	30	C	0.46	A

Figura 4.7 Tabla resumen de indicadores del escenario 1

Fuente: Reporte de Synchro

4.2.2 Escenario 2

En esta propuesta se mantienen las características geométricas, las características de los flujos vehiculares y se modifica los tiempos de operación de los semáforos. Además, se propone la reducción del número de movimientos en cada ciclo (fases), de 4 a sólo 2 en las intersecciones 1 y 2. Se conserva además la longitud de ciclo original de 128 segundos y se disminuyen los tiempos “todo rojo” al mínimo para que los movimientos se realicen instantáneamente al término del anterior.

La *Figura 4.8* muestra las dos fases propuestas. Observamos que la primera fase permite los movimientos norte-sur y viceversa de los vehículos que circulan en Tlalpan. En la segunda fase se permiten los movimientos provenientes de Periférico en ambos sentidos de circulación.

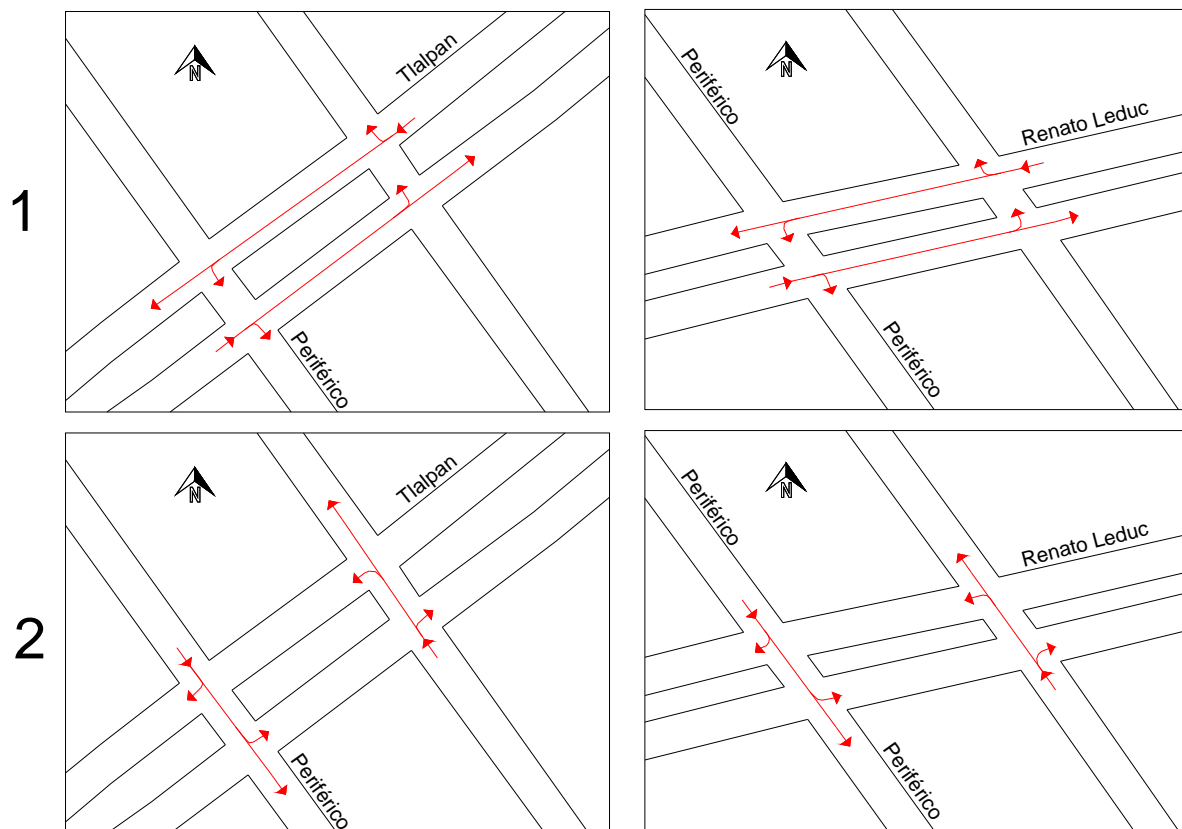


Figura 4.8 Fases propuestas en escenario 2 para la intersección 1 y 2 respectivamente

Fuente: Elaboración propia

Bajo estas condiciones, se obtuvieron mejores resultados al presentarse reducciones en los tiempos de demoras principalmente en las intersecciones 1 y 2, mejorando a su vez los niveles de servicio, cambiando en algunos nodos de F a B.

Para el parámetro ICU LOS, también se mejoraron los valores en la mayoría de nodos de las intersecciones, cambiando a valores A de nivel de servicio.

Lo anterior puede observarse en la siguiente *Figura 4.9*.

Intersección	Nodo	Demoras (s)	LOS	ICU	ICU LOS
1	1	68	E	0.54	A
	2	22	C	0.51	A
	3	25	C	0.52	A
	4	38	D	0.5	A
2	5	17	B	0.67	C
	6	95	F	0.76	D
	7	20	B	0.54	A
	8	20	B	0.49	A
3	9	19	B	0.73	D
	10	25	C	0.55	B
	11	29	C	0.46	A

Figura 4.9 Tabla resumen de indicadores del escenario 2

Fuente: Elaboración propia

4.3.3 Escenario 3

En esta propuesta al igual que en la anterior, se mantienen las características geométricas, las características de los flujos vehiculares y se optimizan por medio de Synchro, los tiempos de operación de los semáforos. Además, se propone de la misma forma, la reducción del número de movimientos en cada ciclo (fases), de 4 a sólo 2 en las intersecciones 1 y 2. La optimización parte de la longitud de ciclo original de 128 segundos y se disminuyen los tiempos “todo rojo” al mínimo para que los movimientos se realicen instantáneamente al término del anterior.

Bajo estas condiciones, el valor óptimo encontrado fue de 95 segundos de tiempo total de ciclo (verde + amarillo + rojo).

En esta propuesta se presentan mejoras considerables comparada con el estado actual, ya que el valor de los niveles de servicio bajan considerablemente a valores de B y C, mientras que los valores de utilización de la capacidad (ICU) se encuentran alrededor de 0.5, significando esto que la intersección cuenta aun con el 50% de capacidad disponible bajo la longitud total de ciclo de 95 segundos. Estos resultados los podemos apreciar en la siguiente *Figura 4.10*.

Intersección	Nodo	Demoras (s)	LOS	ICU	ICU LOS
1	1	19	B	0.54	A
	2	13	B	0.51	A
	3	19	B	0.52	A
	4	23	C	0.5	A
2	5	11	B	0.67	C
	6	29	C	0.76	D
	7	15	B	0.54	A
	8	14	B	0.49	A
3	9	14	B	0.73	D
	10	9	A	0.55	B
	11	11	B	0.46	A

Figura 4.10 Tabla resumen de indicadores del escenario 3

Fuente: Reporte de Synchro

Al ser este escenario la mejor propuesta, se presenta en las *Figuras 4.11, 4.12 y 4.13* la distribución de los tiempos de semáforo de las intersecciones 1, 2 y 3 respectivamente.

Se muestra también los tiempos de verde, amarillo y rojo para cada uno de los semáforos de las tres intersecciones en cuestión.

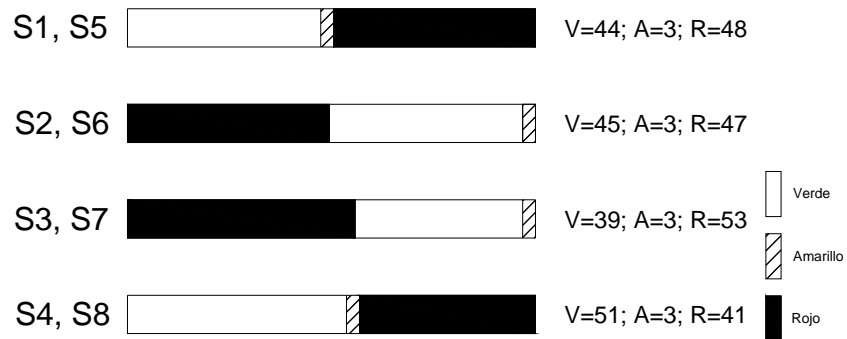


Figura 4.11 Distribución de los tiempos de semáforo en Intersección 1
Fuente: Elaboración propia

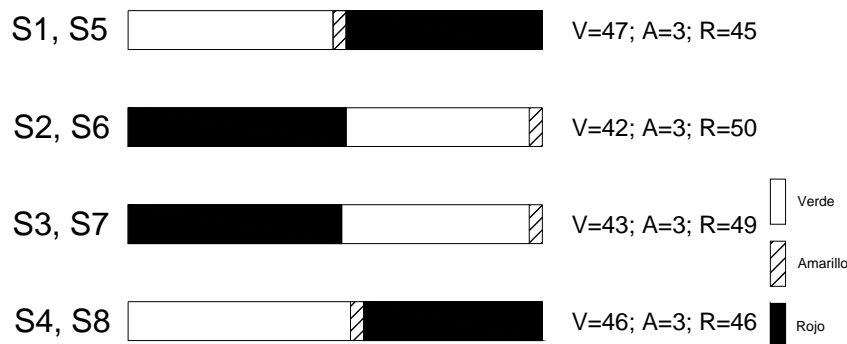


Figura 4.12 Distribución de los tiempos de semáforo en Intersección 2
Fuente: Elaboración propia



Figura 4.13 Distribución de los tiempos de semáforo en Intersección 3
Fuente: Elaboración propia

Como propuesta complementaria al escenario número tres, se propone la implementación de un cruce de cortesía, es decir, un señalamiento que prohíba a los conductores avanzar y obstaculizar el paso a los flujos vehiculares de la fase siguiente, cuando la intersección se encuentre llena. El cruce de cortesía se ilustra a continuación:



Figura 4.14 Cruce de cortesía
Fuente: El Universal

5 Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos en la sección anterior, se puede concluir que el objetivo planteado en un principio se cumple, puesto que los cambios en los tiempos de operación de los semáforos mejoran la circulación de la zona de estudio, al reducir considerablemente los tiempos de demoras y al mejorar los niveles de servicio de todas las intersecciones analizadas, especialmente bajo el escenario número 3. De esta manera, al mejorar la circulación de la zona, se reduce en cierta manera la congestión vehicular y algunas de las consecuencias asociadas a este problema.

Para el caso particular del caso de estudio, la instalación de contadores vehiculares, la conexión de los semáforos a un mando central o inclusive la puesta en marcha de semáforos inteligentes, pudieran ayudar a mejorar aun más la circulación vehicular.

También, la modificación de diversas conductas viales podría mejorar las condiciones de tránsito en las intersecciones, evitando conflictos que bloquean la circulación.

Es necesario recalcar que la propuesta de cambio de los tiempos de semáforos, no soluciona, por sí sola, el problema de la congestión. Ya que este es un problema generado causas diversas y en donde se hace necesaria la participación de múltiples disciplinas, además de la ingeniería de transporte.

Por mencionar un ejemplo, la puesta en marcha de acciones sobre el ordenamiento vial en materia de transporte público impulsado por las autoridades, ayudaría a descongestionar diversas zonas de la capital, incluyendo la zona de estudio, puesto que se observó una gran cantidad de microbuses que obstaculizan el libre flujo de los vehículos particulares y de los mismos vehículos de pasajeros.

Se puede decir que la planeación regional es indispensable si se quiere solucionar los grandes problemas de congestión que aqueja las ciudades, ya que está puede lograr satisfacer las necesidades de transporte de los habitantes con adecuados niveles de servicio.

Para ello se requiere la colaboración activa de diversos entes, tanto a nivel público como a nivel privado. Gobernantes, inversionistas, planeadores, profesionales en transporte, etc., requieren de una visión amplia que les permita desarrollar soluciones que permitan el libre desarrollo de todas las actividades económicas, culturales, sociales, deportivas, etc., propias de cualquier ciudad, de forma armónica con sus ciudadanos y con el ambiente.

En cuanto a la modelación se puede concluir que la representación de la zona de estudio resultó adecuada puesto que se logró obtener un modelo suficientemente detallado que permitió probar las diferentes propuestas de operación de los semáforos. Así mismo los datos arrojados por el modelo y por la simulación mostraron ser válidos al compararse con los datos obtenidos en campo.

En este sentido, se puede concluir que la simulación resulta ser una poderosa herramienta de análisis, que debe sin duda ser aprovechada, puesto que permite probar tantas soluciones como se desee, en un entorno controlado y a un muy bajo costo.

La simulación provee además las herramientas necesarias para optimizar un conjunto de intersecciones que se encuentren cercanas entre sí, como lo fue la zona de estudio de esta tesis. De esta manera puede representarse un mando central que coordine dichas intersecciones y que puede ser objeto de investigación futura.

Por su parte, Synchro resulta ser un buen paquete de computación para el análisis de intersecciones y operación de semáforos, ya que utiliza las metodologías del Manual de Capacidad de Carreteras (HCM) y que en México es aceptado y se utiliza frecuentemente.

En este último aspecto se debe hacer mención en la posibilidad de desarrollar metodologías y software particulares para las condiciones de las vialidades de las ciudades mexicanas, ya que las condiciones de las vías, por mencionar un ejemplo, no

son consideradas en Synchro y pueden conducir a variaciones significativas a la hora de obtención de resultados.

No obstante, Synchro permite representar intersecciones de manera sencilla y práctica, por lo que en el ANEXO 1 de esta tesis se muestra una guía para modelar y optimizar los tiempos de semáforo utilizando Synchro. En este anexo se presentan los parámetros más relevantes y necesarios para el modelado de cualquier intersección de forma rápida, clara y sencilla.

Referencias

BULL, Alberto. *Congestión de tránsito. El problema y cómo enfrentarlo*. CEPAL. Chile, 2003.

MEDINA, Salvador. *Transformando la movilidad urbana en México*. Instituto de Políticas para el Transporte y el Desarrollo México. Embajada Británica. México, 2012.

MEDINA, Salvador y ROSAS, Jimena. *Desarrollo Orientado al Transporte*. Instituto de Políticas para el Transporte y el Desarrollo México. Embajada Británica. México, 2013.

FIMEVIC. *Diagnóstico de la Movilidad de las personas en la Ciudad de México*. Recuperado de: <http://www.fimevic.df.gob.mx/problemas/1diagnostico.htm>

CISNEROS, Roberto. *Como es la población de México Su presente y futuro en 15 claves*. Recuperado de: <http://mexico.cnn.com/nacional/2014/07/11/como-es-la-poblacion-de-mexico-su-presente-y-futuro-en-15-claves>

TARRIBA, Gabriel y ALARCÓN Gabriela. *Movilidad competitiva en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México: Diagnóstico y soluciones factibles*. Instituto Mexicano para la Competitividad. México, 2012.

GOBIERNO DEL DISTRITO FEDERAL. *Programa Integral de Movilidad*. Gaceta Oficial del Distrito Federal. México D.F., 2014.

SEMOVI, *Estadísticas*. Recuperado de: <http://www.semovi.df.gob.mx/wb/stv/estadisticas.html>

THOMSON, Ian y BULL, Alberto. *Urban Traffic congestion: its economic and social causes and consequences*. CEPAL. Chile, 2002.

ORTUZAR, Juan y Willumsen, Luis. *Modelos de transporte*. Universidad de Cantabria. Madrid, 2008.

CNN Expansión. *¿Se te va la vida en el tráfico?* Recuperado de: <http://www.cnnexpansion.com/mi-carrera/2011/07/15/se-te-va-la-vida-en-el-trafico-cuidado>.

EL UNIVERSAL. *Los costos del tráfico*. Marzo 2013. Recuperado de: <http://archivo.eluniversal.com.mx/articulos/76607.html>.

CAL y MAYOR, Rafael y CÁRDENAS, James. *Ingeniería de tránsito. Fundamentos y aplicaciones*. 7ª edición. Alfaomega. México, 1994.

JIMÉNEZ, Ana. *Intersecciones*. Dirección General de Tráfico, España, 2013.

DIRECCIÓN GENERAL DE CAMINOS Y FERROCARRILES. *Manual de Carreteras: Diseño Geométrico, DG-2013*. Perú, 2013.

SCT. *Manual de dispositivos para el control del tránsito en calles y carreteras*. México. 1986

SCT. *Manual de Estudios de Ingeniería de Tránsito*. Dirección General de Ordenación del Territorio. México, s/f.

EDUCAR. *Los Modelos en Ciencia*. Recuperado de: <http://www.educ.ar/sitios/educar/recursos/ver?id=70054>. Buenos Aires, Argentina.

ABAD, Ricardo. *Introducción a la simulación y a la teoría de colas*. 1ª edición, NETBIBLO. La Coruña, 2002.

TEXSON, Griselda. *Diseño de un simulador de vuelo para la compra y venta de acciones en el mercado accionario mexicano*. UDLA. Puebla, 2005.

TARIFA, Enrique. *Teoría de modelos de simulación*. Facultad de Ingeniería, universidad Nacional de Jujuy.

GARCÍA, Eduardo *et al.* *Simulación y análisis de sistemas con ProModel*. 1ª edición, Pearson Educación, México, 2006.

PÉREZ, Raúl. *Módulo de simulación microscópica para la herramienta TRAMOS, integración de modelos y animación*. ETSI, Universidad de Sevilla, 2005.

TRAFFICWARE. *Manual de Usuario de Synchro Studio*, 2011.

El poder del consumidor. Figura 2.1 [Imagen]. Recuperado de: <http://elpoderdelconsumidor.org/transporteeficiente/es-hora-de-conformar-un-plan-integral-de-movilidad-y-transporte-publico-en-el-valle-de-mexico/>.

Ciudadanos en Red. Figura 2.2 [Imagen]. Recuperado de: <http://ciudadanosenred.com.mx/infopractica/conecta-setravi-rutas-con-paraderos-de-l-12>.

El Universal. Figura 2.3 [Imagen]. Recuperado de: <http://archivo.eluniversal.com.mx/primera/40516.html>.

MX Noticias. Figura 2.4 [Imagen]. Recuperado de: <http://mxqnoticias.mx/2014/11/28/quinto-sabado-del-mes-que-automoviles-podran-circular/>.

Urban 360. Figura 2.5 [Imagen]. Recuperado de: <http://news.urban360.com.mx/148636/casi-mil-500-automovilistas-sancionados-por-invadir-ciclovias/>.

SDP Noticias. Figura 2.7 [Imagen]. Recuperado de: <http://www.sdpsnoticias.com/local/ciudad-de-mexico/2014/07/07/df-carece-de-transporte-publico-para-afectados-por-hoy-no-circula-sabatino-asegura-academico>.

Nicolás Corte. Publimetro. Figura 2.8 [Imagen]. Recuperado de: <http://www.publimetro.com.mx/noticias/el-verdadero-juego-del-semaforo-descompuesto/pkea!1CWAyNq7yBvycaxWEkfpCw/>.

Portal Conduzca. Figura 2.17 y 2.18 [Imagen]. Recuperado de: <http://www.conduzca.com/normas.html>.

SCT. Figura 2.19. [Imagen]. Recuperado de: SCT, *Señalamiento horizontal y vertical de carreteras y vialidades urbanas*.

Diariocol. Figura 2.20. [Imagen]. Recuperado de: <http://www.diariocol.com.ar/local/74935-nuevos-reductores-de-velocidad>.

Blog La información. Figura 2.21. [Imagen]. Recuperado de: <http://blogs.lainformacion.com/top-motor/2010/12/04/el-sector-del-automovil-de-otro-pais-en-imagenes-iii/>.

Comercializadora Grupo Fractal. Figura 2.22. [Imagen]. Recuperado de: <http://comercializadoragrupofractal.bligoo.com.mx/senalamiento-vial-horizontal-y-de-proteccion-de-obra>.

GPLeds. Figura 2.23. [Imagen]. Recuperado de: <http://www.gpleds.com/online-store/semaforos/semaforo-3-luces-detail>.

GPLeds. Figura 2.24. [Imagen]. Recuperado de: <http://www.gpleds.com/online-store/semaforos/peaton-detail>.

Sofía Bejarano del Blog Tiempos de Enfoque y Blog Qualitas Auto. Figura 2.25. [Imagen]. Recuperado de: <https://tiemposdeenfoque.wordpress.com/2010/06/21/los-semaforos-y-su-historia/> y de <http://blog.qualitasauto.com/primer-semaforo-historia/>.

Trafictec. Figura 2.26 y 2.27. [Imagen]. Recuperado de: <http://www.trafictec.com>

Eyssa. Figura 2.28. [Imagen]. Recuperado de: <http://www.eyssa.com.mx/Semaforos.html>.

Four Sided. Figura 2.29. [Imagen]. Recuperado de: http://es.123rf.com/imagenes-de-archivo/four_sided.html.

CAL y CÁRDENAS, 1994. Figura 2.30 y 2.31. *Fases y Diagramas de una Intersección*. [Imagen]. Libro *Ingeniería de Tránsito*, Página 398.

SCT. Figura 2.32. “Manual de Estudios de Ingeniería de Tránsito” de la SCT, página 6, 9 y 10.

El Universal. Figura 4.13. [Imagen]. Recuperado de: <http://archivo.eluniversal.com.mx/notas/699979.html>

Anexos

Anexo 1

“Guía para optimizar los tiempos de semáforo en intersecciones con Synchro”

Se enumera a continuación cada uno de los pasos a seguir para modelar, analizar y optimizar los tiempos de semáforo de cualquier intersección. Para ejemplificar dicho proceso se modelará la intersección número 1.

Paso 1

En primer lugar se debe buscar la imagen de referencia de la intersección e ingresarla en Synchro por medio de la opción, **File -- Select Background**.

En la cuadro de dialogo se debe seleccionar la opción **Add File(s)**. A continuación se selecciona el archivo de la imagen de referencia y en la opción **Scale**, se introduce una medida conocida de la intersección en el cuadro **Meters**, en seguida se seleccionan dos puntos dentro de la imagen que equivalgan a la medida antes ingresada. Este procedimiento se realiza para escalar la imagen. En el caso de ejemplo se midieron 24 metros entre el cruce de Calzada de Tlalpan (*Figura A.1*).

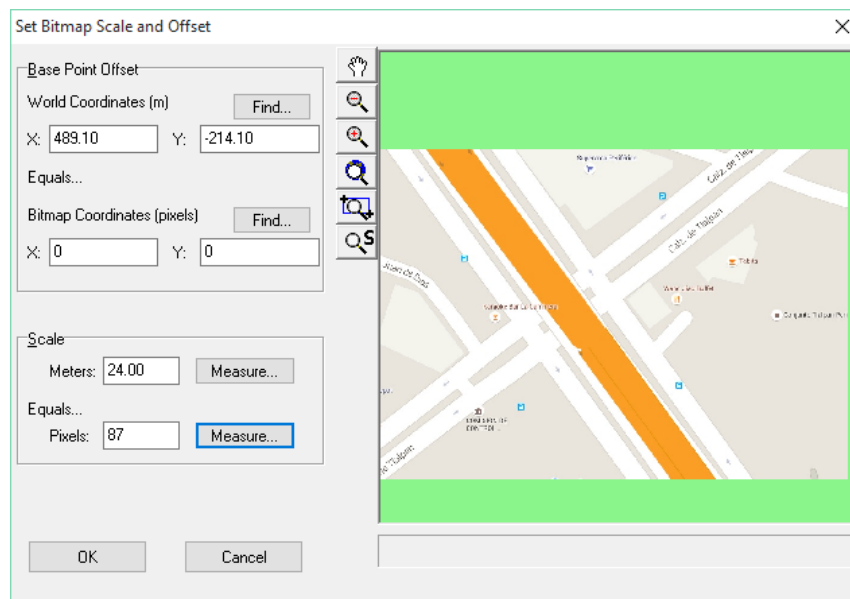


Figura A.1 Escalado de imagen de referencia

Fuente: Synchro

Al presionar *OK* en los dos cuadros de diálogos, la imagen queda establecida en Synchro y se puede proceder a modelar las avenidas (*Figura A.2*).

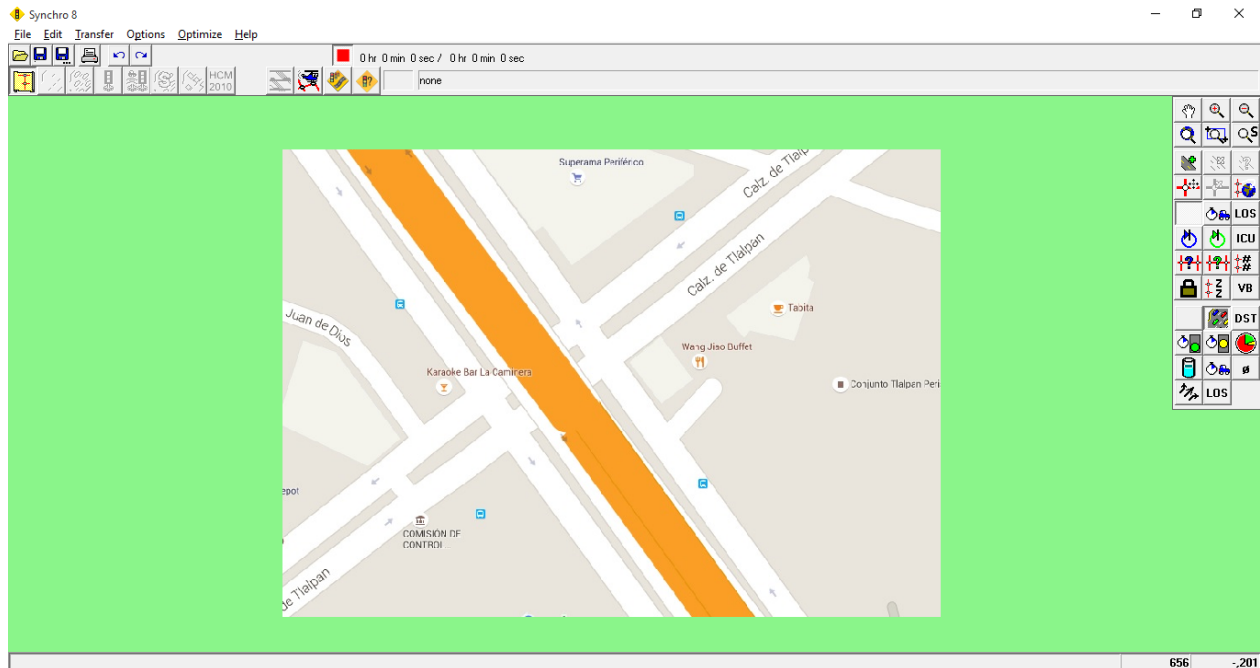


Figura A.2 Ingreso de imagen de referencia en Synchro

Fuente: Synchro

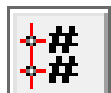
Paso 2

Para modelar las avenidas se selecciona de la barra de herramientas de la derecha, la opción **Add Link**.



Icono **Add Link**

Se procede a dibujar cada una de las avenidas que conforman la intersección. En el cruce de dos líneas, se generarán automáticamente nodos de intersección. Seleccionando el ícono **Show Node Numbers**, se puede mostrar el nombre de los nodos creados (*Figura A.3*).



Icono **Show Node Numbers**

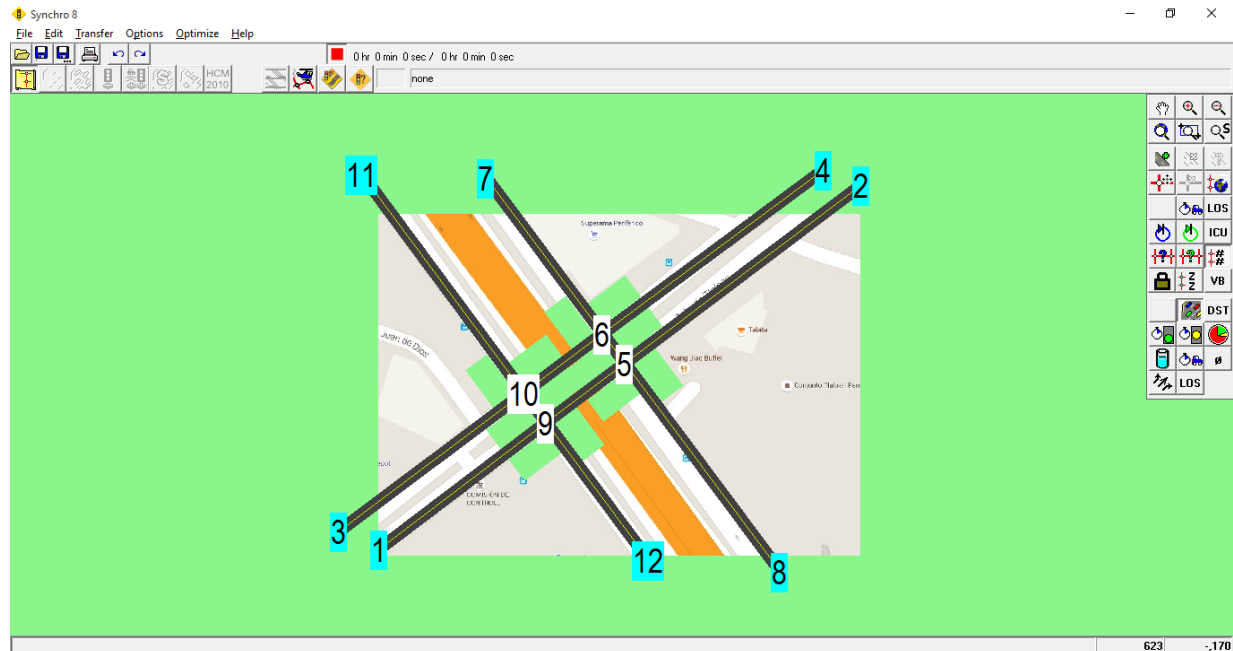


Figura A.3 Líneas y nodos
Fuente: Synchro

Una vez modeladas las vialidades, se puede ocultar la imagen de referencia para tener un espacio de trabajo limpio. Esto se realiza ingresando nuevamente en **File – Select Backgrounds** y marcando la casilla **Hide** dentro del cuadro de dialogo mostrado (Figura A.4).

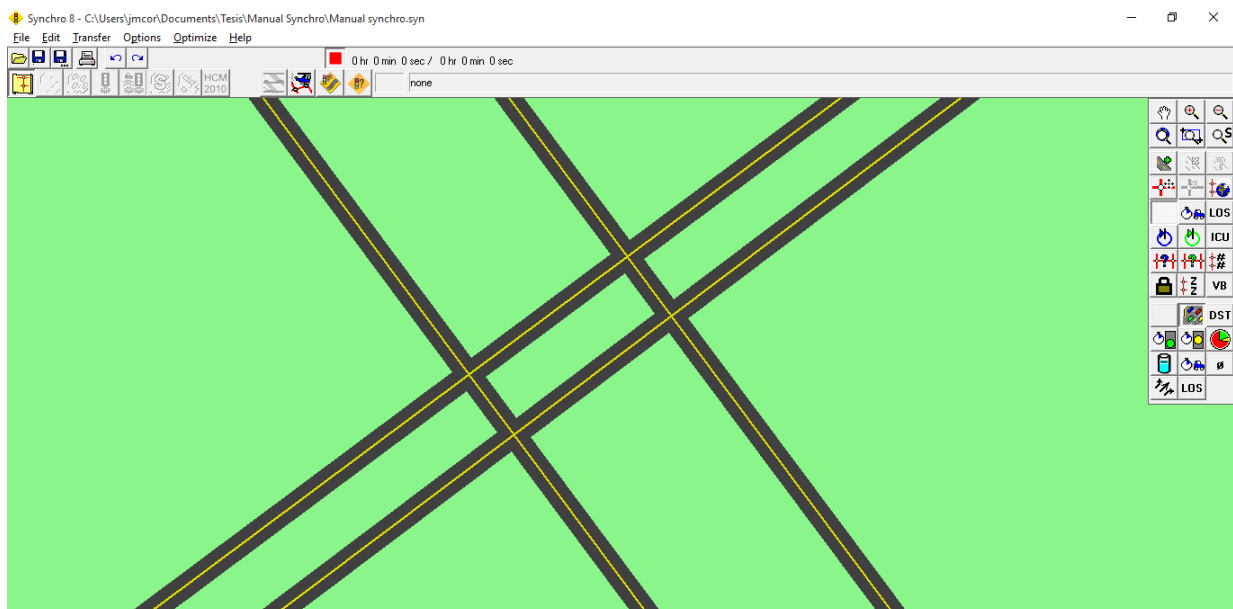


Figura A.4 Modelado de avenidas
Fuente: Synchro

Paso 3

El siguiente paso es ingresar información general de las vialidades haciendo doble clic en cada uno de los accesos a las intersecciones, para abrir el cuadro de información **Lane Settings**, como se muestra a continuación.

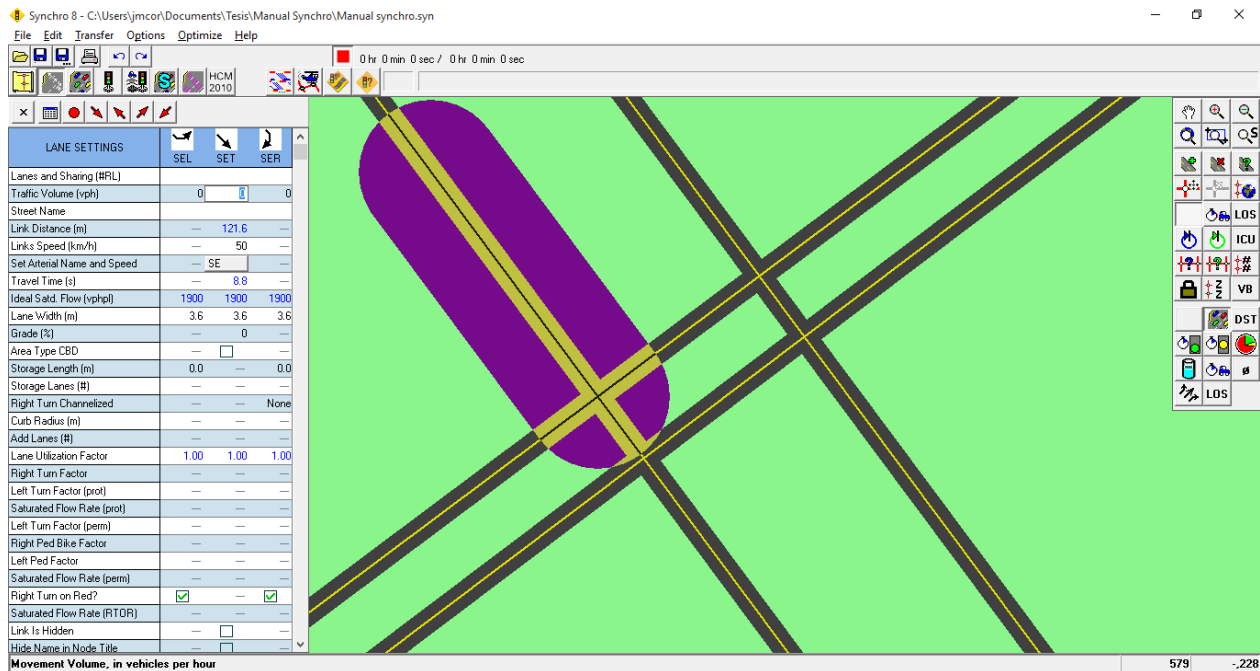


Figura A.5 Lane Settings

Fuente: Synchro

En este cuadro de información se debe ingresar la siguiente información:

- Lanes and Sharing: Número de carriles que existen para cada dirección mostrada.
- Traffic Volume: Volumen horario promedio derivado del aforo vehicular.
- Street Name: El nombre de la vialidad si así se desea.
- Link Speed: Se refiere a la velocidad de acceso a la intersección en km/h
- Lane Width: Se ingresa el ancho de carril en metros.
- Grade: Pendiente del acceso a la intersección, en grados.
- Right Turn Channelized: Se puede agregar una canalización para los giros establecidos previamente en Lanes and Sharing, indicando si es paso libre, cedido o semaforzado.
- Curb Radius: Se establece el radio de giro de la canalización modelada.
- Right Turn on Red?: Se activa la casilla si se permite el giro a la derecha cuando el semáforo se encuentre en rojo.



Figura A.6 Ingreso de volúmenes horarios promedio
Fuente: Synchro

De forma similar se selecciona cada acceso a la intersección hasta completar el llenado para toda la intersección. En el ejemplo se modelaron cuatro intersecciones con vueltas a la derecha canalizadas (Figura A.7).



Figura A.7 Ingreso de volúmenes horarios promedio
Fuente: Synchro

Paso 4

El paso 4 es agregar más información acerca de los flujos vehiculares, haciendo doble clic en cada acceso de la intersección y seleccionando a su vez el icono Volume Settings de la barra de herramientas que se ubica en la parte superior del espacio de trabajo.



Icono **Volume Settings**



Figura A.8 Volume Settings

Fuente: Synchro

En este cuadro de información se debe ingresar la siguiente información:

- Heavy Vehicles: El porcentaje de vehículos pesados que transitan por el acceso.
- Bus Blockages: El número de bloqueos producidos por microbuses.

Paso 5

Se debe introducir información en cada uno de los nodos, al hacer doble clic en ellos, se mostrará el cuadro de información: **Node Settings**.

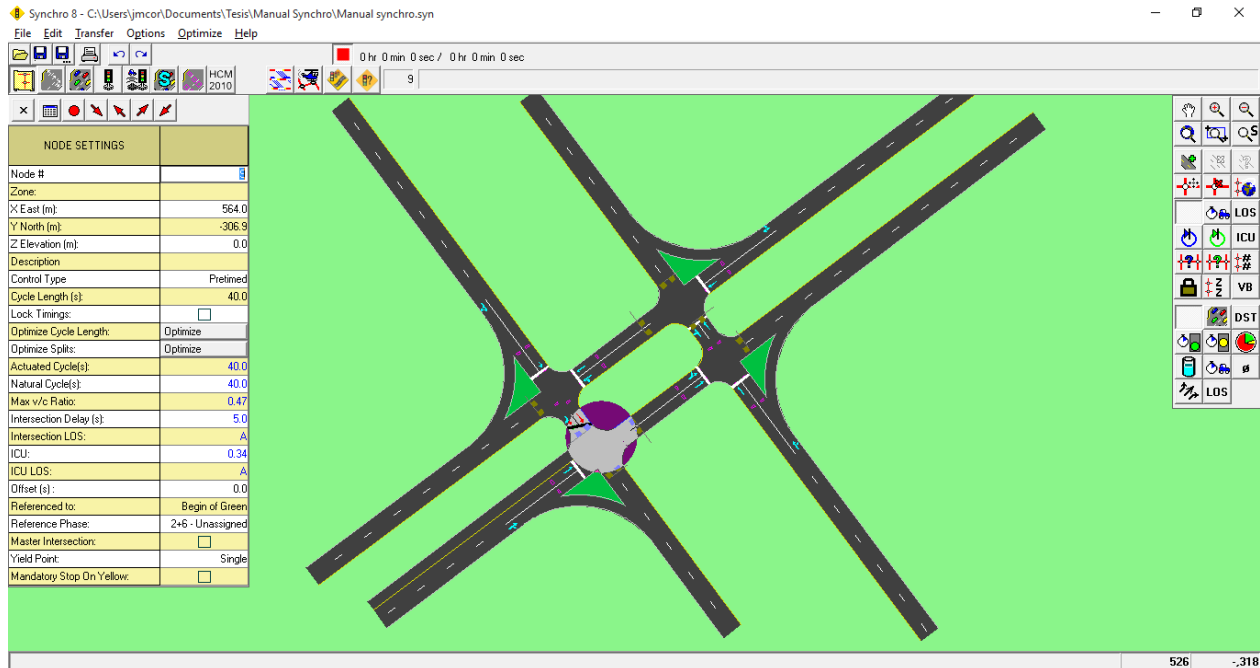


Figura A.9 Node Settings

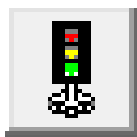
Fuente: Synchro

En este cuadro de información se debe ingresar la siguiente información:

- Control Type: El tipo de semáforo (Tiempo fijo, actuado no coordinado, semi-actuado no coordinado, actuado coordinado), si el nodo no tiene semáforo, o si se trata de una glorieta.
- Cycle Length: El tiempo de ciclo de los semáforos.

Paso 6

El sexto paso es agregar la información referente a las fases o movimientos permitidos dentro de cada ciclo. Seleccionado un nodo, se debe hacer clic en el icono **Timing Settings** para acceder al cuadro de dialogo mostrado.



Icono **Timing Settings**

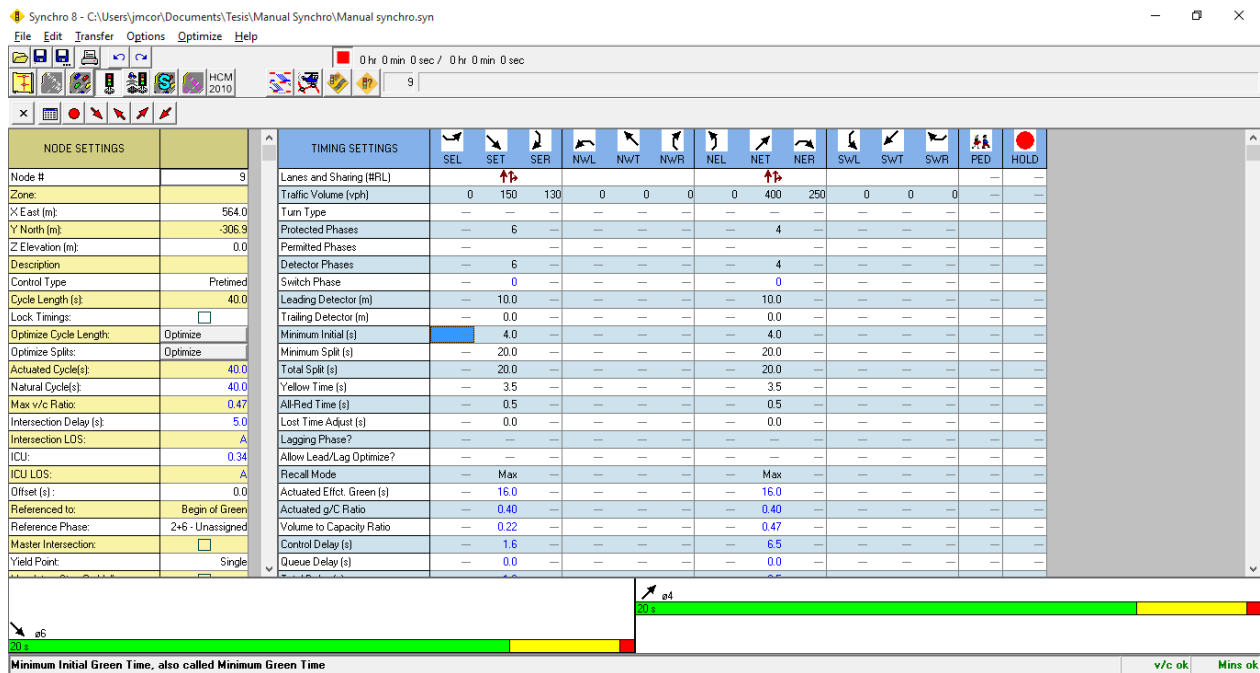


Figura A.10 Timing Settings
Fuente: Synchro

En este cuadro de información se debe ingresar la siguiente información:

- Protected phases: Los movimientos protegidos que tienen preferencia de paso durante el tiempo de verde. En la parte inferior se puede conocer el número de fase correspondiente a cada movimiento establecido en *Lanes and Sharing* del paso 3.
- Permitted phases: Los movimientos que pueden ser permitidos mientras se encuentra la indicación de semáforo en rojo, siempre y cuando no obstaculice la circulación que tiene el movimiento permitido en ese instante.
- Total Split: Es el tiempo total que se establece para la realización de cada fase que comprende el tiempo de verde, tiempo de amarillo y el tiempo “todo rojo” (V+A+TR).
- Yellow Time: Es el tiempo de indicación amarilla que se desea en el semáforo.
- All-red Time: Es el tiempo en que permanece simultáneamente la señal de rojo en ambos semáforos de una intersección, que tiene por objeto limpiar la intersección antes de que inicie los siguientes movimientos vehiculares.

Paso 7

A continuación se ingresan algunos parámetros necesarios para la realización de la simulación por medio del icono **Simulation Settings**.



Icono **Simulation Settings**

SIMULATION SETTINGS	SEL	SET	SER	NwL	NwT	NwR	NEL	NET	NER	SwL	SwT	SwR
Lanes and Sharing (#RL)		↑↓						↑↓				
Traffic Volume (vph)	0	150	130	0	0	0	0	400	250	0	0	0
Storage Length (m)	0.0	—	0.0	0.0	—	0.0	0.0	—	0.0	0.0	—	0.0
Storage Lanes (#)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Taper Length (m)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Lane Alignment	Left	Left	Right	Left	Left	Right	Left	Left	Right	Left	Left	Right
Lane Width (m)	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6
Enter Blocked Intersection	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No
Median Width (m)	—	0.0	—	—	0.0	—	—	0.0	—	—	0.0	—
Link Offset (m)	—	0.0	—	—	0.0	—	—	0.0	—	—	0.0	—
Crosswalk Width (m)	—	4.8	—	—	4.8	—	—	4.8	—	—	4.8	—
TWLTTL Median	—	<input type="checkbox"/>	—	—	<input type="checkbox"/>	—	—	<input type="checkbox"/>	—	—	<input type="checkbox"/>	—
Headway Factor	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Turning Speed (km/h)	25	—	15	25	—	15	25	—	15	25	—	15
Mandatory Distance (m)	—	60.0	—	—	60.0	—	—	60.0	—	—	60.0	—
Positioning Distance (m)	—	416.7	—	—	416.7	—	—	416.7	—	—	416.7	—
Mandatory Distance 2 (m)	—	277.8	—	—	277.8	—	—	277.8	—	—	277.8	—
Positioning Distance 2 (m)	—	555.6	—	—	555.6	—	—	555.6	—	—	555.6	—

Figura A.11 Simulation Settings

Fuente: Synchro

En el cuadro de información, se ingresa la información:

- Enter Blocked Intersection: Este campo permite elegir si los vehículos en la intersección puede entrar a la intersección cuando ésta se encuentra llena, cuando se selecciona NO, los vehículos esperan

Paso 8

Con esta información ingresada en Synchro se verifica que el funcionamiento de la intersección represente el comportamiento real de la intersección. Con el icono **Sim Traffic Animation**, se accede a **Sim Traffic** y se puede ver la simulación de la intersección.



Icono **Sim Traffic Animation**

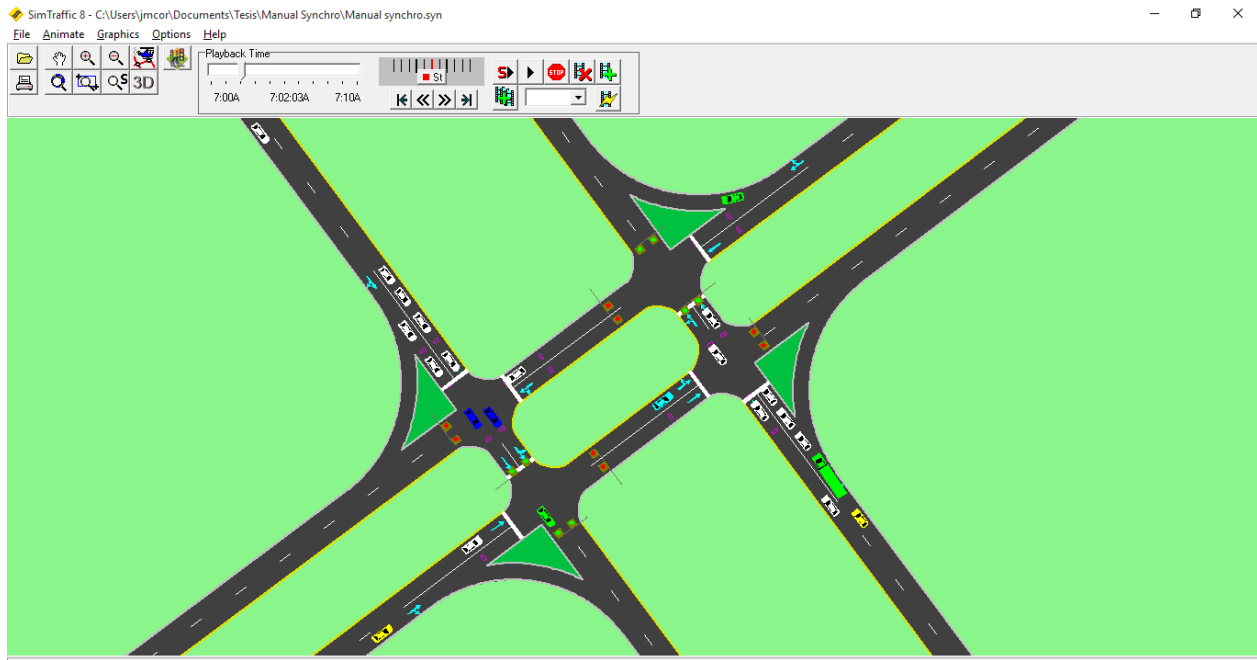


Figura A.12 Sim Traffic
Fuente: Synchro

Si la simulación resulta poco representativa del comportamiento real de la intersección, es posible regresar a cualquiera de los pasos 2 al 7 para mejorar el modelo y cambiar los parámetros necesarios.

Paso 9

Una vez verificado el modelo se procede a proponer mejoras a la intersección, modificando las características geométricas de los accesos, probando longitudes de ciclo y tiempos de verde, amarillo y rojo, o utilizando el menú **Optimize -- Network Cycle Lengths**.

En el cuadro de dialogo mostrado se selecciona el mínimo y máximo tiempo de ciclo, así como los incrementos que se desean probar.

Se puede seleccionar la opción **Manual** o **Automatic** (Figura A.13). La primera opción permite ver las iteraciones realizadas e información de las demoras debidas a las diversas longitudes de ciclo. Se puede seleccionar cualquier longitud de ciclo y al dar clic en OK, se transferirá dicha información a las intersecciones modeladas. La segunda opción asigna de forma automática el tiempo de ciclo a las intersecciones.

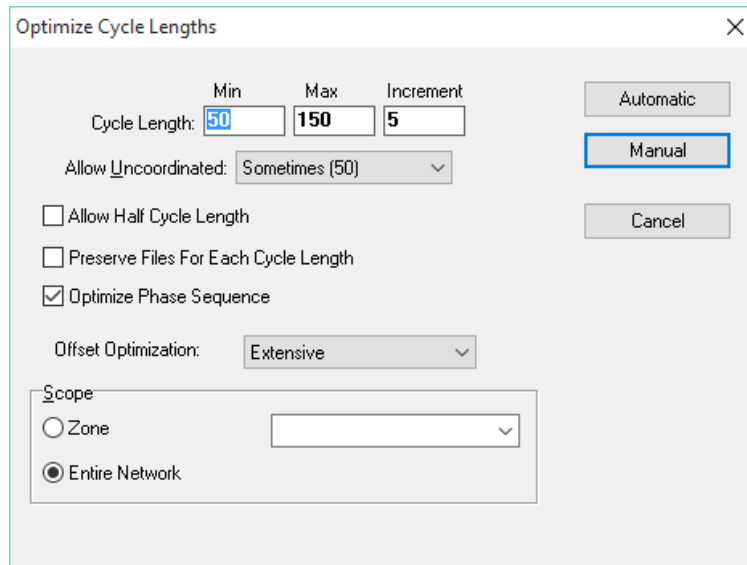


Figura A.13 Optimización de longitud de ciclo
Fuente: Synchro

Cycle Length	Perform Index	Block Delay (hr)	Total Delay (hr)	Delay / Veh (s)	Total Stops	Stops / Veh	Fuel (l)	Unserved Vehicles	Dilemma Vehicles	% Dilemma Vehicles	Average Spd (km/hr)
50	10	0	6	6	1236	0.33	69	0	0	0%	18
55	10	0	6	6	1337	0.36	72	0	0	0%	18
60	10	0	7	6	1302	0.35	73	0	0	0%	18
65	11	0	7	7	1290	0.34	73	0	0	0%	18
70	11	0	7	7	1321	0.35	75	0	0	0%	17
75	11	0	8	7	1329	0.35	76	0	0	0%	17
80	12	0	8	8	1351	0.36	77	0	0	0%	17
85	12	0	8	8	1359	0.36	79	0	0	0%	16
90	12	0	9	8	1358	0.36	80	0	0	0%	16
95	13	0	9	9	1390	0.37	82	0	0	0%	16
100	13	0	9	9	1393	0.37	83	0	0	0%	15
105	14	0	10	9	1419	0.38	84	0	0	0%	15
110	14	0	10	10	1439	0.38	86	0	0	0%	15
115	15	0	11	10	1471	0.39	88	0	0	0%	14
120	15	0	11	11	1490	0.40	90	0	0	0%	14
125	16	0	12	11	1502	0.40	91	0	0	0%	14
130	16	0	12	12	1526	0.41	93	0	0	0%	14
135	17	0	13	12	1555	0.41	95	0	0	0%	13
140	18	0	13	13	1596	0.42	98	0	0	0%	13
145	18	0	14	13	1594	0.42	99	0	0	0%	13
150	19	1	14	14	1599	0.43	100	0	0	0%	12

Zone: (all) [dropdown]

OK [button] Cancel [button]

Cycle Length: 50
Number of intersections: 4
Uncoordinated: 0
Half Cycled: 0
Locked Other: 0

Figura A.14 Iteraciones con diferentes longitudes de ciclo
Fuente: Synchro

Paso 10

Finalmente se puede generar reportes accediendo al menú **File – Create Report** (Figura A.15). En el cuadro de dialogo se puede seleccionar que información se desea del modelo, como información de los carriles, volúmenes, fases, niveles de servicio, demoras, etc.

Ejemplos de los reportes que proporciona Synchro, se pueden observar en los Anexos2 y 3 de este trabajo.

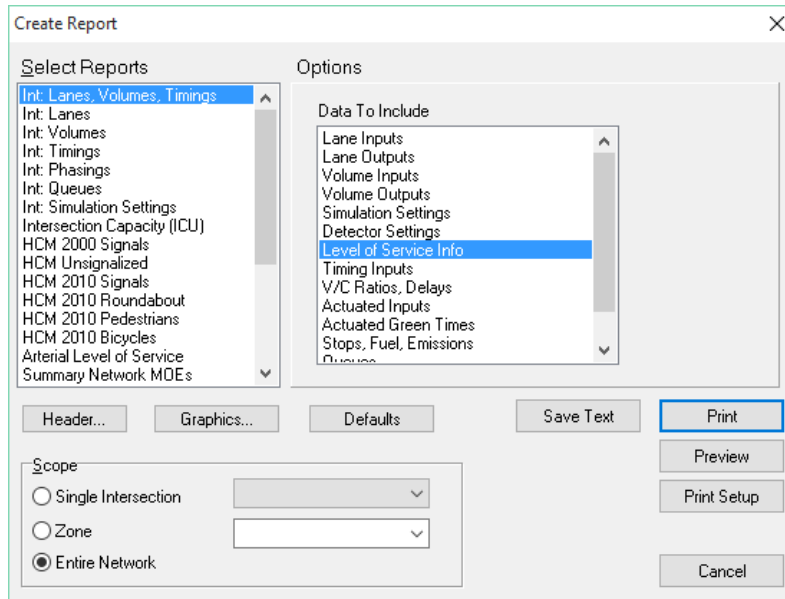


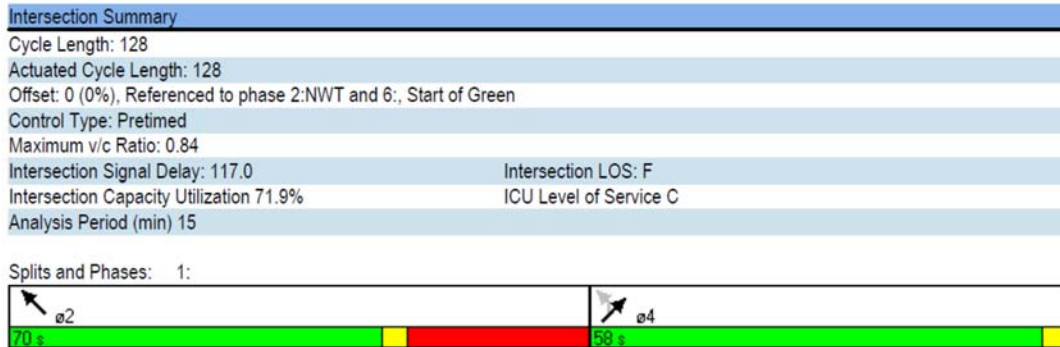
Figura A.15 Reporte de Synchro

Fuente: Synchro

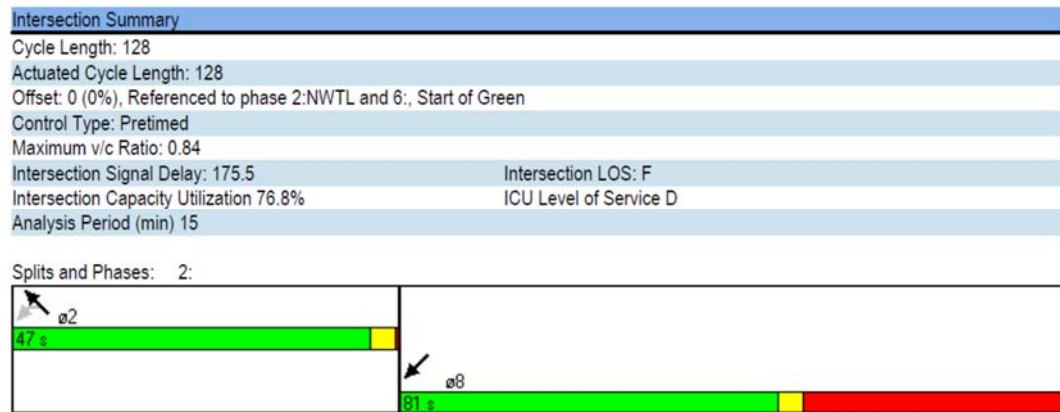
Anexo 2

“Reporte de Synchro del Estado Actual. FUENTE: Reporte de Synchro”

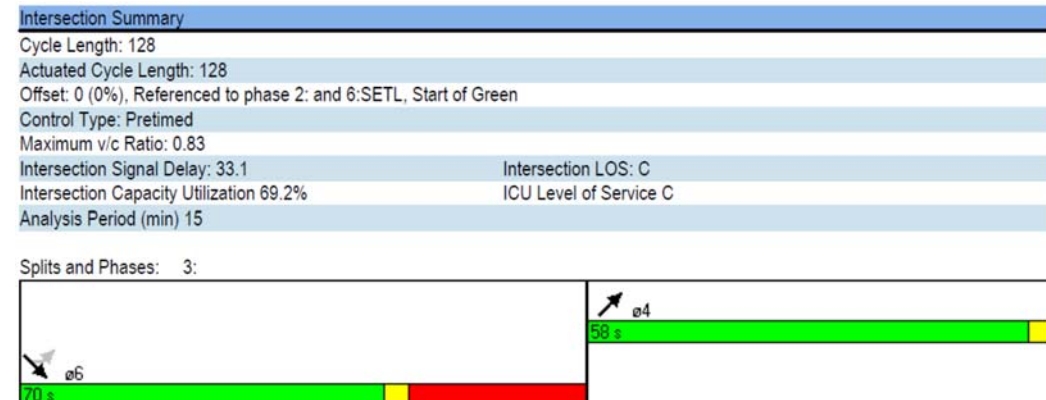
Información Nodo 1



Información Nodo 2



Información Nodo 3



Información Nodo 4

Intersection Summary	
Cycle Length: 128	
Actuated Cycle Length: 128	
Offset: 0 (0%), Referenced to phase 2: and 6:SET, Start of Green	
Control Type: Pretimed	
Maximum v/c Ratio: 0.91	
Intersection Signal Delay: 140.8	Intersection LOS: F
Intersection Capacity Utilization 75.5%	ICU Level of Service D
Analysis Period (min) 15	

Splits and Phases: 4:



Información Nodo 5

Intersection Summary	
Cycle Length: 128	
Actuated Cycle Length: 128	
Offset: 0 (0%), Referenced to phase 2:NWT and 6:, Start of Green	
Control Type: Pretimed	
Maximum v/c Ratio: 0.76	
Intersection Signal Delay: 62.9	Intersection LOS: E
Intersection Capacity Utilization 84.7%	ICU Level of Service E
Analysis Period (min) 15	
dl Defacto Left Lane. Recode with 1 though lane as a left lane.	

Splits and Phases: 5:



Información Nodo 6

Intersection Summary	
Cycle Length: 128	
Actuated Cycle Length: 128	
Offset: 0 (0%), Referenced to phase 2:NWTL and 6:, Start of Green	
Control Type: Pretimed	
Maximum v/c Ratio: 1.43	
Intersection Signal Delay: 247.1	Intersection LOS: F
Intersection Capacity Utilization 102.3%	ICU Level of Service G
Analysis Period (min) 15	

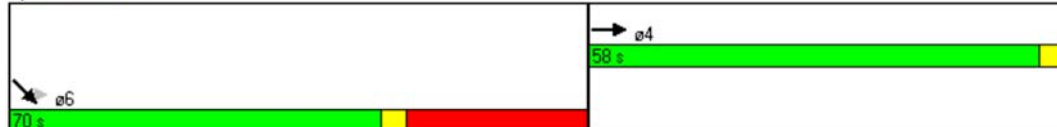
Splits and Phases: 6:



Información Nodo 7

Intersection Summary	
Cycle Length: 128	
Actuated Cycle Length: 128	
Offset: 0 (0%), Referenced to phase 2: and 6:SETL, Start of Green	
Control Type: Pretimed	
Maximum v/c Ratio: 0.73	
Intersection Signal Delay: 24.4	Intersection LOS: C
Intersection Capacity Utilization 71.4%	ICU Level of Service C
Analysis Period (min) 15	

Splits and Phases: 7:



Información Nodo 8

Intersection Summary	
Cycle Length: 128	
Actuated Cycle Length: 128	
Offset: 0 (0%), Referenced to phase 2: and 6:SET, Start of Green	
Control Type: Pretimed	
Maximum v/c Ratio: 0.81	
Intersection Signal Delay: 51.8	Intersection LOS: D
Intersection Capacity Utilization 75.3%	ICU Level of Service D
Analysis Period (min) 15	

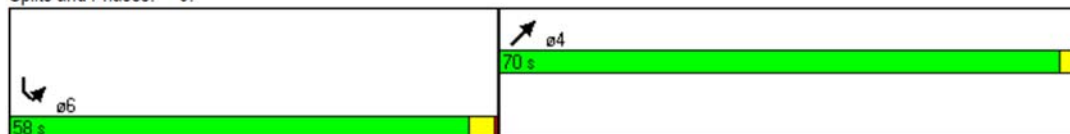
Splits and Phases: 8:



Información Nodo 9

Intersection Summary	
Cycle Length: 128	
Actuated Cycle Length: 128	
Offset: 0 (0%), Referenced to phase 2: and 6:SBL, Start of Green	
Control Type: Pretimed	
Maximum v/c Ratio: 0.48	
Intersection Signal Delay: 37.3	Intersection LOS: D
Intersection Capacity Utilization 73.1%	ICU Level of Service D
Analysis Period (min) 15	

Splits and Phases: 9:



Información Nodo 10

Intersection Summary	
Cycle Length: 128	
Actuated Cycle Length: 128	
Offset: 0 (0%), Referenced to phase 2:NET and 6:SBT, Start of Green	
Control Type: Pretimed	
Maximum v/c Ratio: 0.95	
Intersection Signal Delay: 216.6	Intersection LOS: F
Intersection Capacity Utilization 55.2%	ICU Level of Service B
Analysis Period (min) 15	
! Phase conflict between lane groups.	

Splits and Phases: 10:



Información Nodo 11

Intersection Summary	
Cycle Length: 128	
Actuated Cycle Length: 128	
Offset: 0 (0%), Referenced to phase 2: and 6:SWT, Start of Green	
Control Type: Pretimed	
Maximum v/c Ratio: 0.64	
Intersection Signal Delay: 22.8	Intersection LOS: C
Intersection Capacity Utilization 45.7%	ICU Level of Service A
Analysis Period (min) 15	

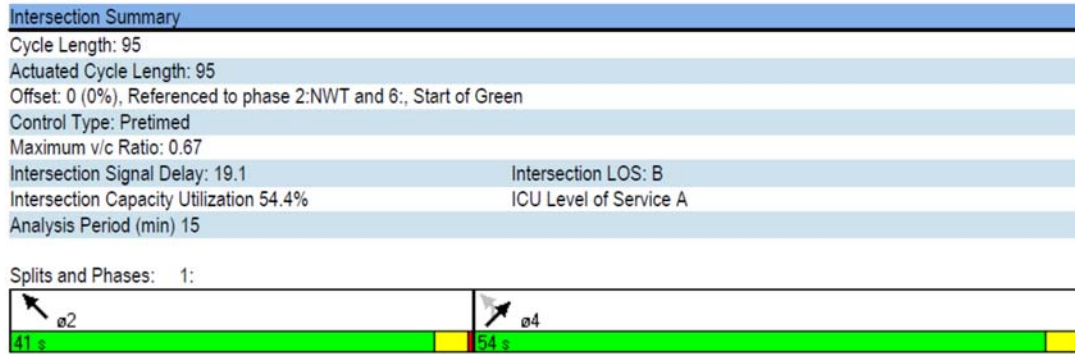
Splits and Phases: 11:



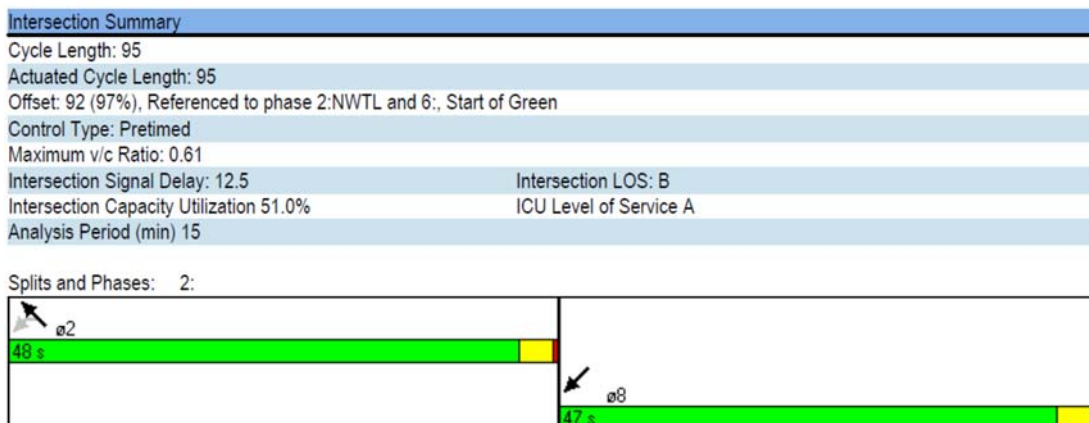
Anexo 3

“Reporte de Synchro del Escenario 3. FUENTE: Reporte de Synchro”

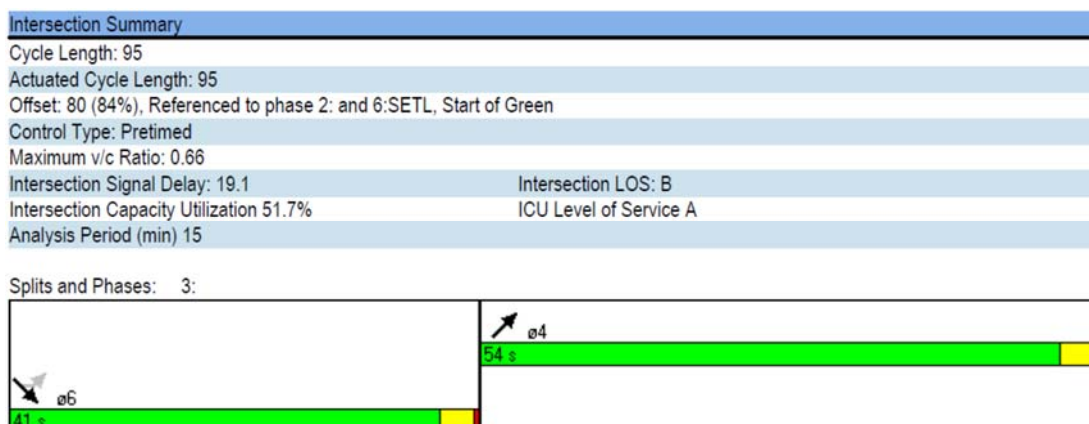
Información Nodo1



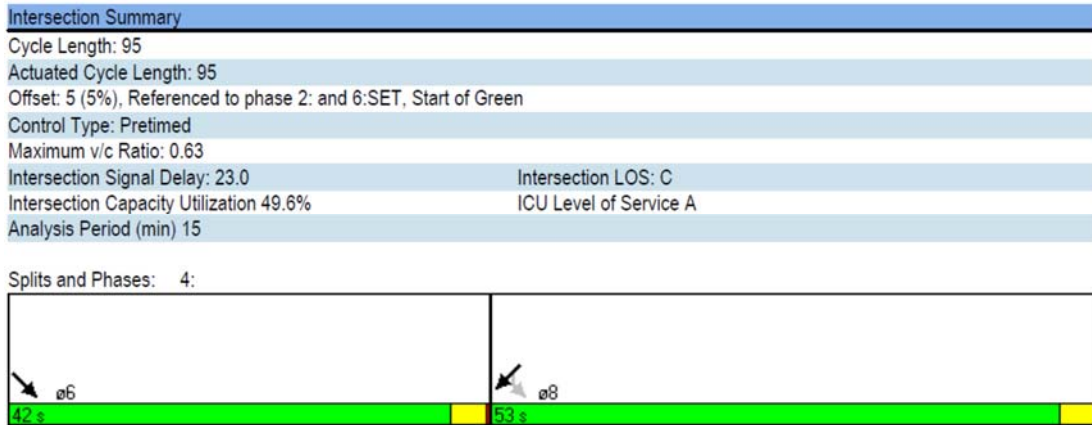
Información Nodo 2



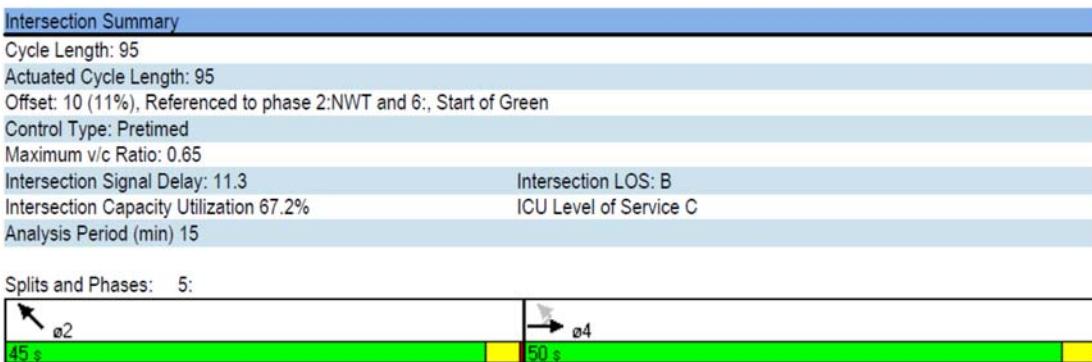
Información Nodo 3



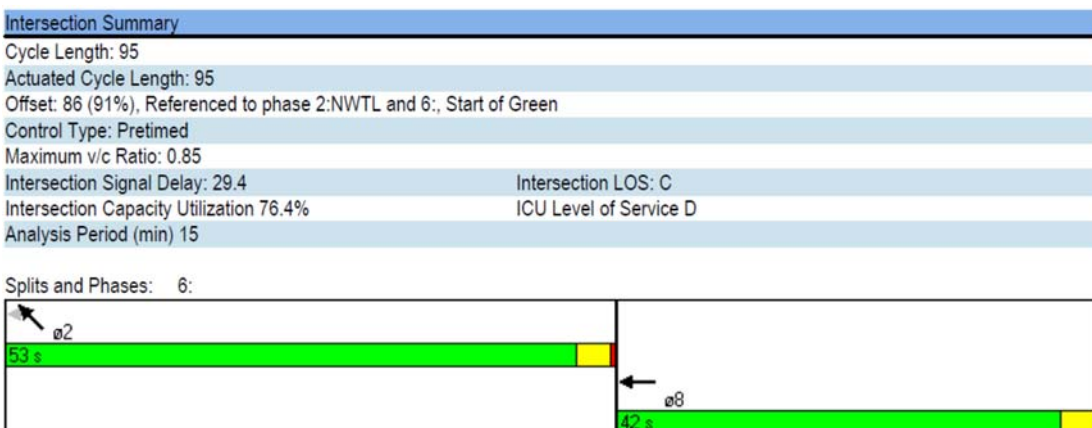
Información Nodo 4



Información Nodo 5

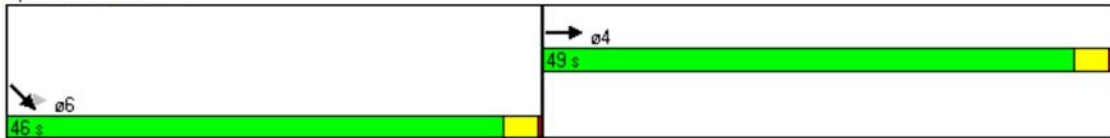


Información Nodo 6



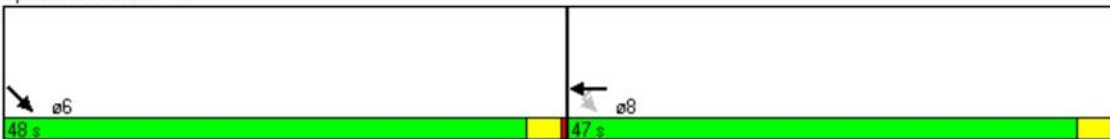
Información Nodo 7

Intersection Summary	
Cycle Length: 95	
Actuated Cycle Length: 95	
Offset: 0 (0%), Referenced to phase 2: and 6:SETL, Start of Green	
Control Type: Pretimed	
Maximum v/c Ratio: 0.63	
Intersection Signal Delay: 14.9	Intersection LOS: B
Intersection Capacity Utilization 53.9%	ICU Level of Service A
Analysis Period (min) 15	
Splits and Phases: 7:	



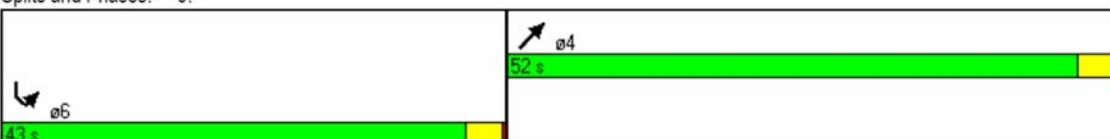
Información Nodo 8

Intersection Summary	
Cycle Length: 95	
Actuated Cycle Length: 95	
Offset: 0 (0%), Referenced to phase 2: and 6:SET, Start of Green	
Control Type: Pretimed	
Maximum v/c Ratio: 0.58	
Intersection Signal Delay: 13.9	Intersection LOS: B
Intersection Capacity Utilization 49.5%	ICU Level of Service A
Analysis Period (min) 15	
Splits and Phases: 8:	



Información Nodo 9

Intersection Summary	
Cycle Length: 95	
Actuated Cycle Length: 95	
Offset: 0 (0%), Referenced to phase 2: and 6:SBL, Start of Green	
Control Type: Pretimed	
Maximum v/c Ratio: 0.49	
Intersection Signal Delay: 13.8	Intersection LOS: B
Intersection Capacity Utilization 73.1%	ICU Level of Service D
Analysis Period (min) 15	
Splits and Phases: 9:	



Información Nodo 10

Intersection Summary	
Cycle Length: 95	
Actuated Cycle Length: 95	
Offset: 6 (6%), Referenced to phase 2:NET and 6:SBT, Start of Green	
Control Type: Pretimed	
Maximum v/c Ratio: 0.45	
Intersection Signal Delay: 9.3	Intersection LOS: A
Intersection Capacity Utilization 55.2%	ICU Level of Service B
Analysis Period (min) 15	
! Phase conflict between lane groups.	

Splits and Phases: 10:



Información Nodo 11

Intersection Summary	
Cycle Length: 95	
Actuated Cycle Length: 95	
Offset: 84 (88%), Referenced to phase 2: and 6:SWT, Start of Green	
Control Type: Pretimed	
Maximum v/c Ratio: 0.44	
Intersection Signal Delay: 10.6	Intersection LOS: B
Intersection Capacity Utilization 45.7%	ICU Level of Service A
Analysis Period (min) 15	

Splits and Phases: 11:

