



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Coordinación de Semáforos
en la Avenida Miguel Ángel
de Quevedo**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Ricardo Peña Garibay

DIRECTOR DE TESIS

M.I. Francisco Javier Granados Villafuerte



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2016



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

RESUMEN

Esta tesis tiene como objetivo coordinar los semáforos de la avenida Miguel Ángel de Quevedo, ubicada al sur de la ciudad de México en la delegación Coyoacán. Para el análisis se definió un tramo comprendido por las vialidades Insurgentes e Ignacio Zaragoza. Para lograr dicho objetivo se recopiló la información vial manualmente, obteniendo tiempos de recorrido, aforos vehiculares y la programación semafórica. Posteriormente se modeló el corredor en el programa de microsimulación de tránsito VISSIM®, partiendo del mismo para lograr la coordinación semafórica y reducir los tiempos de recorrido lo mayor posible. Además de este documento se cuenta con un video del modelo en 3D de antes y después de la coordinación, donde puede observarse la coordinación de los semáforos.

ABSTRACT

This thesis has the objective of coordinating the signal control presented in Miguel Ángel de Quevedo Avenue, located in South Mexico City, Mexico. For the analysis it was defined a section between Insurgentes Avenue and Ignacio Zaragoza Street. To achieve this purpose, vehicle data was gathered manually, extracting travel times, vehicle count and signal control data. Afterwards, the corridor was modeled in the microsimulation software VISSIM®, working as a startline for coordinating the signal control and reducing travel times as most as possible. Besides this document, a video was made with a 3D model from VISSIM®, benchmarking the corridor before and after the signal control coordination.

DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS

A mis padres Ricardo e Ivonne y a mi hermano Mauricio, que me han apoyado y amado siempre durante cualquier etapa de mi vida.

A mi novia Ana que siempre me ha apoyado durante mi carrera profesional y en la vida en general. A su vez hago una mención especial en agradecimiento por ayudarme a realizar los aforos para este trabajo.

A mi Universidad, que me brindó excelencia académica y me dejó además de conocimientos, una experiencia muy especial que recordaré toda mi vida.

A mí director de tesis, el Profesor Granados y a todos mis sinodales: Rodrigo Sepúlveda, Juan Ocariz, Miguel Ángel Rodríguez y Alejandro Saniger. A Juan Ocariz un especial agradecimiento por ser mi tutor durante la carrera y brindarme siempre su apoyo y sus buenos consejos. A Alejandro Saniger por todo el apoyo técnico brindado en VISSIM. Y a Miguel Ángel Rodríguez por ser un excelente ejemplo a seguir, siendo el mejor coordinador de carrera y por siempre ver por los estudiantes, brindando todo su apoyo.

A todos y cada uno de mis compañeros: gracias por ser parte de esta experiencia.

Finalmente, esta tesis es dedicada principalmente a Dios, que ha sido el sostén de mi vida y que por Él y para Él son todas las cosas. Alcanzar esta meta se lo agradezco primeramente a Dios.

*"He peleado la buena batalla, he acabado la carrera, he guardado la fe."
2 Timoteo 4:7*

CONTENIDO

RESUMEN	II
ABSTRACT	III
DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS.....	IV
CONTENIDO	V
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1	
INTERSECCIONES SEMAFORIZADAS	3
1.1. ANTECEDENTES	3
1.2. GENERALIDADES.....	3
1.3. TIPOS DE SEMÁFOROS.....	4
1.3.1. Tiempo Fijo.....	5
1.3.2. Coordinados	5
1.3.3. Semiaccionados	6
1.3.4. Completamente Accionados.....	6
1.4. TEORÍA DE INTERSECCIONES SEMAFORIZADAS CON TIEMPO FIJO	7
1.4.1. Definiciones	7
1.4.2. Tiempos de un Semáforo	7
1.4.3. Modelo del Flujo de Saturación	11
1.4.4. Factor de Progresión y Tipo de Llegada.....	12
1.5. CAPACIDAD Y NIVELES DE SERVICIO EN INTERSECCIONES SEMAFORIZADAS	14
CAPÍTULO 2	
COORDINACIÓN DE SEMÁFOROS.....	15
2.1. VELOCIDAD DE RECORRIDO.....	15
2.2. CAPACIDAD Y NIVELES DE SERVICIO EN ARTERIAS SEMAFORIZADAS.....	15
2.3. SISTEMAS DE COORDINACIÓN.....	18
2.4. DIAGRAMAS ESPACIO-TIEMPO	19
CAPÍTULO 3	
TEORÍA DE MICROSIMULACIÓN	21
3.1. GENERALIDADES	21
3.2. MODELO DE SEGUIMIENTO VEHICULAR	22
3.3. MODELO DE CAMBIO DE CARRIL.....	24
3.4. MODELO DE COMPORTAMIENTO LATERAL.....	25
3.5. MODELO DE REACCIÓN A LA LUZ ÁMBAR	25
3.6. PROCESO PARA OPTIMIZAR LA PROGRAMACIÓN SEMAFÓRICA.....	27
CAPÍTULO 4	
CORREDOR EN ESTUDIO	29
4.1. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y GEOMÉTRICAS.....	29
4.1.1. Carriles	30
4.2. AFOROS	30
4.3. HORA PICO	31
4.4. TIEMPOS DE RECORRIDO	32
4.5. PROGRAMACIÓN DE LOS SEMÁFOROS	32
4.5.1. Programación a lo Largo de la Avenida.....	34

CAPÍTULO 5

MODELO DE MICROSIMULACIÓN	36
5.1. TRAMOS Y CONECTORES	36
5.2. DISTRIBUCIONES	37
5.2.1. De Velocidad	37
5.2.2. De Tiempo	37
5.3. VEHÍCULOS EN LA RED	38
5.3.1. Composición del Tránsito	38
5.3.2. Entradas Vehiculares	39
5.3.3. Decisiones de Ruta	39
5.4. TRANSPORTE PÚBLICO	39
5.4.1. Rutas	39
5.4.2. Paradas	42
5.5. SEMÁFOROS	44
AVENIDA INSURGENTES SUR	45
ARENAL / CHIMALISTAC	45
UNIVERSIDAD	46
CERRO DEL HOMBRE	46
IGNACIO ZARAGOZA	47
5.6. CONSIDERACIONES TÉCNICAS	47
5.6.1. Zonas de Conflicto	47
5.6.2. Reglas de Prioridad	47
5.6.3. Señales de Alto	48
5.6.4. Estacionamientos	49
5.6.5. Comportamiento del Conductor	49
5.7. COORDINACIÓN DE LOS TIEMPOS SEMAFÓRICOS	49

CAPÍTULO 6

RESULTADOS	50
6.1. TIEMPOS DE RECORRIDO	50
6.2. DIAGRAMAS ESPACIO-TIEMPO	51
ANTES DE LA COORDINACIÓN	51
DESPUÉS DE LA COORDINACIÓN	52
6.3. NUEVA PROGRAMACIÓN SEMAFÓRICA	52
INSURGENTES	53
ARENAL	54
UNIVERSIDAD	54
CERRO DEL HOMBRE	55
IGNACIO ZARAGOZA	55
6.4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	56

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES	57
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59

ANEXO A

RESULTADOS DE LOS AFOROS	60
AVENIDA INSURGENTES SUR	60
AVENIDA DE LA PAZ / ARENAL / LOMBARDO TOLEDANO	61
CHIMALISTAC / ARENAL	62
PASEO DEL RÍO	63
AVENIDA UNIVERSIDAD	64
PANZACOLA	65
CERRO DEL HOMBRE	66
IGNACIO ZARAGOZA	67
AFOROS PARCIALES DE 15 MINUTOS	67

(IGNACIO ALLENDE, SALVADOR NOVO, CERRADA MIGUEL ÁNGEL DE QUEVEDO, CERRADA PEDREGAL Y KAPPA)	68
---------------------------------------------------------------------------------------------------	----

ANEXO B

DIAGRAMAS DE VOLÚMENES EN HORA PICO.....69

AVENIDA INSURGENTES SUR / SAN LUIS POTOSÍ / CRACOVIA.....	69
ARENAL / AVENIDA DE LA PAZ / LOMBARDO TOLEDANO.....	70
ARENAL / CHIMALISTAC.....	71
IGNACIO ALLENDE.....	72
PASEO DEL RÍO.....	73
AV. UNIVERSIDAD.....	74
PANZACOLA.....	75
SALVADOR NOVO.....	76
CERRO DEL HOMBRE.....	77
CERRADA PEDREGAL.....	78
CERRADA MIGUEL ÁNGEL DE QUEVEDO.....	79
KAPPA.....	80
IGNACIO ZARAGOZA.....	81

INTRODUCCIÓN

La Ingeniería en Tránsito ha sido un tema muy poco conocido en México, pocas personas conocen de su existencia y sin embargo toda la gente en una sociedad vive diariamente inmiscuida en ella. Todo mundo incluso puede opinar sobre ella debido a la cercanía que se tiene, sin embargo lo poco conocido en la sociedad es la ingeniería que se encuentra detrás del transporte, a pesar de ello todo mundo tiene siempre una opinión sobre el tráfico, y más cuando éste es un tema de peso en la vida diaria de las personas.

Un artículo publicado en septiembre del 2011 por IBM, de tema: “Frustration Rising: IBM 2011 Commuter Pain Surver. Smarter Traffic”, cataloga a la Ciudad de México como la número uno en materia de “dolor o sufrimiento en el tráfico”, donde puede verse que en comparación con otras ciudades del mundo, la ciudad de México está ampliamente desfavorecida en este sentido. A continuación se muestra dicha estadística en la Figura 11:

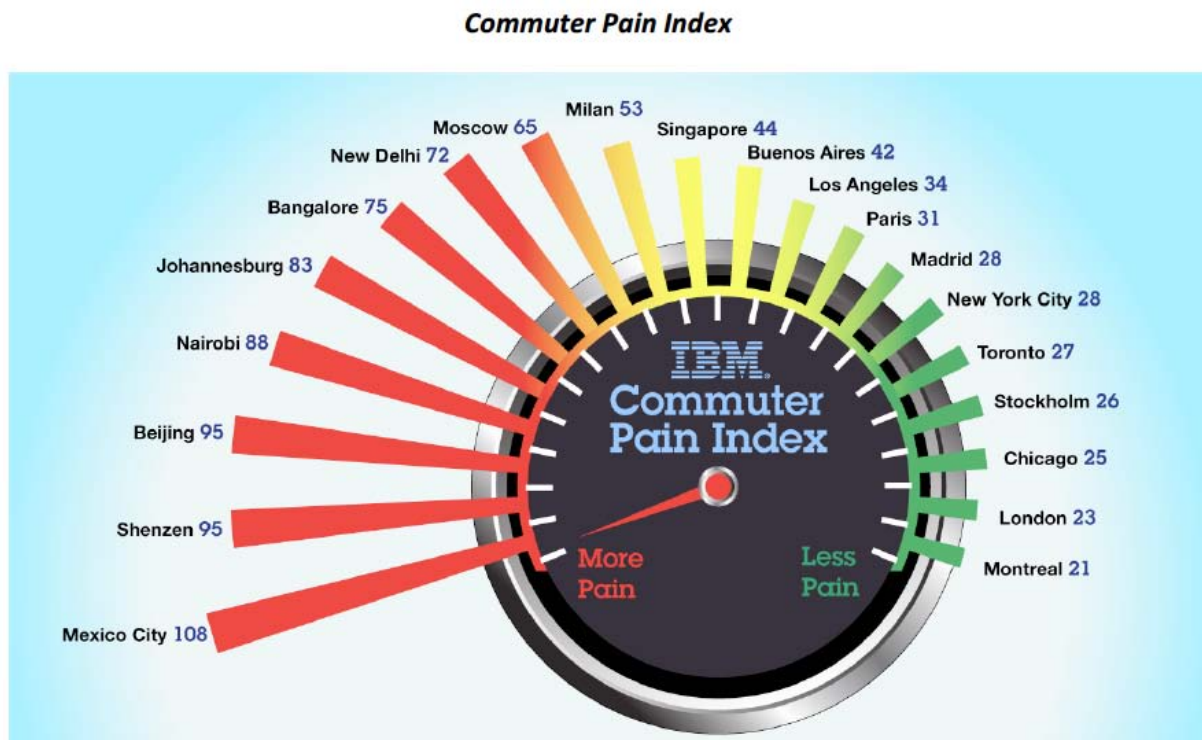


Figura 11. Índice de Dolor Provocado por el Tráfico

Fuente: Frustration Rising: IBM 2011 Commuter Pain Surver. Smarter Traffic, IBM, 2011

Yo, como muchos otros ciudadanos capitalinos, he sido víctima de condiciones extremas de tráfico y dado el poco conocimiento y difusión de la Ingeniería de Tránsito en México, he tomado estas dos fuentes como inspiración para realizar esta tesis. Para ello he decidido enfocar mi tesis en Coordinación de Semáforos, un tema básico para mejorar las condiciones de servicio de una avenida. De ahí, he escogido la avenida Miguel Ángel de Quevedo para el estudio, ya que es una avenida que he transcurrido prácticamente toda mi vida y conozco su operación, problemáticas y cambios que ha tenido a lo largo del tiempo.

Hoy día he detectado que la avenida Miguel Ángel de Quevedo presenta condiciones desfavorables de servicio, principalmente en los semáforos, que presentan siempre demoras que pueden reducirse y se tiene una mala progresión a lo largo del corredor. Uno de mis objetivos en esta tesis será lograr la mejor coordinación de semáforos posible, demostrando que haciéndolo se reducen los tiempos de recorrido y se reducen demoras. Esto representará una solución de muy bajo costo ya que únicamente plantearé cómo se puede lograr una coordinación de semáforos por medio de cambiar los desfases semafóricos.

Primeramente será necesario tomar aforos de todos los cruces del tramo de avenida que tomaré para el estudio. Para ello me apoyará una persona a realizar los conteos y utilizaremos contadores múltiples para registrar la información vial. Esta información será el punto de partida para analizar las condiciones actuales de la avenida y continuar con el estudio propuesto.

El analizar la avenida en sus condiciones actuales de servicio será también uno de mis objetivos. Para ello utilizaré el programa de microsimulación VISSIM, de PTV Group; software que me permitirá modelar el corredor en computadora y analizar más a detalle la avenida. Con el mismo software podré obtener resultados para posteriormente generar diagramas de tiempo-espacio y proponer un cambio en la programación semafórica; buscando siempre la coordinación de los semáforos.

Esta tesis por lo tanto generará una propuesta de cambios en los desfases de los ciclos semafóricos, para mejorar las condiciones de coordinación semafórica en la avenida. Esto de antemano brindará una solución inmediata para optimizar los tiempos de recorrido, utilizando los recursos que se tienen actualmente. Como objeto de otro estudio más detallado, puede realizarse un análisis para proponer el uso de semáforos adaptativos; solución que posiblemente brindaría los mejores resultados ya que utiliza la información del tráfico en tiempo real para lograr siempre las mejores condiciones de servicio.

CAPÍTULO 1

INTERSECCIONES SEMAFORIZADAS

1.1. ANTECEDENTES

La historia del transporte es sumamente interesante, ésta ha desglosado la manera en la que el hombre ha transportado recursos de diferente tipo para fomentar el intercambio de los mismos, ya sea para fines comerciales, políticos, sociales o militares. Esta historia comienza desde la creación de la rueda, siguiendo por el trazo de caminos, desarrollo de medios de transporte y ahora en los tiempos actuales se ha llegado más al estudio de ellos en cuanto a su operación. La historia y antecedentes más relevantes para contextualizar la teoría de intersecciones semaforizadas comienzan desde la motorización de los vehículos, cuando a finales del siglo XIX se inventó el automóvil de gasolina en Alemania por medio de Carl Benz.

Para fines prácticos, las problemáticas que hoy se tienen en la ingeniería de tránsito comienzan hace más de 80 años, una vez que se comercializó el automóvil y los caminos comenzaron a adaptarse para el uso adecuado de los mismos. Posteriormente, para un mundo motorizado, se han desarrollado distintas logísticas para el funcionamiento de los transportes, donde también participa el desarrollo de la mecánica y electrónica. Fue necesario inventar dispositivos de seguridad y señalamiento debido a los problemas que surgían diariamente por el uso de estos medios de transporte.

Primeramente los dispositivos de señalamiento fueron enteramente manuales, disponiendo el uso de personal de tránsito y herramientas y señales manuales para organizar el mismo. Con el incremento de los vehículos en las calles y el incremento poblacional en las ciudades, la complejidad para controlar el tránsito urbano fue en aumento, conllevando al desarrollo de soluciones para los problemas viales que se presentaban, con el fin de informar, prevenir, resguardar y controlar a los usuarios de los medios de transporte.

El descubrimiento y desarrollo de la electricidad y la informática propició la creación de los semáforos, siendo dispositivos que lograban controlar y regular el tránsito en dos vialidades que se cruzaban. Éstos tuvieron su implementación para automóviles, transporte público, trenes y peatones principalmente. En términos generales se tuvieron semáforos consistentes en un conjunto de luces verdes, amarillas y rojas operadas por una unidad de control que servía para operar el comportamiento de las luces.

Las problemáticas ocasionadas por la operación de los semáforos conllevan a regularizar los mismos, estudiando su funcionamiento para lograr una buena optimización y maximizar su provecho. Hoy en día lo que rige a la ingeniería de tránsito en México proviene generalmente de los Estados Unidos, donde se desarrolló el “Highway Capacity Manual”, sirviendo como punto de partida para la teoría de la Ingeniería de Tránsito que hoy conocemos. En México se ha adaptado este manual por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes para desarrollar los reglamentos y normativas que rigen la Ingeniería de Tránsito mexicana, destacando el “Manual de Dispositivos de Tránsito”.

1.2. GENERALIDADES

Los tres elementos básicos de la Ingeniería de Tránsito son el usuario (conductores y peatones), el vehículo y la vialidad. El usuario sería el actor principal, el vehículo aquél que permite el transporte por las vialidades y las vialidades el medio por el cual se involucran y desplazan estos entes. Para llevar a cabo el análisis de un sistema de transporte automotriz urbano, será necesario analizar estos elementos de manera separada y en conjunto para poder dictaminar las problemáticas que surgen y posteriormente proponer soluciones.

Los dispositivos de control de tránsito, como los semáforos, surgen por la necesidad de optimizar las condiciones de seguridad y operación de los vehículos transitando por las vialidades. De aquello podría considerarse a los semáforos como parte de las vialidades, que permiten un control de los vehículos a través de la interacción de los usuarios con los semáforos.

Para semaforizar un cruce, primeramente debe determinarse si éste justifica semaforizarse o no, esto se determina cuando se tiene alguna de las siguientes condiciones: teniendo un número mínimo de vehículos, cuando se presenten condiciones muy desfavorables para calles secundarias en cruces con calles principales de mucha demanda, cuando se tenga un volumen mínimo de peatones, búsqueda de una circulación progresiva o prevención de accidentes. Cuando el cruce deba semaforizarse deberá primeramente de asignarse una progresión de fases, estas son aquellos movimientos (en frente, vuelta izquierda, vuelta izquierda únicamente, vuelta peatones, etc) que regirán la logística de la circulación de los vehículos. Posteriormente se asignará la manera de operar los semáforos, ya sea por tiempos fijos o por detectores, donde las teorías son distintas y se verán más adelante.

En el marco teórico de esta tesis se englobará principalmente la operación de los semáforos en intersecciones, donde se podrá ver cuál es la teoría que se involucra para asignar tiempos, ciclos y movimientos; posteriormente se estudiarán a los semáforos en conjunto, donde se podrá analizar su operación a lo largo de un corredor.

1.3. TIPOS DE SEMÁFOROS

De acuerdo al “Manual de Dispositivos para el Control del Tránsito en Calles y Carreteras” de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, los semáforos se definen como: “...dispositivos eléctricos que sirven para ordenar y regular el tránsito de vehículos y peatones en calles y carreteras por medio de luces generalmente de color rojo, amarillo y verde, operados por una unidad de control”.

Los semáforos tienen como funciones principales:

- Interrumpir periódicamente el flujo del tránsito vehicular en un cruce con 2 o más vialidades para dar el paso a otra corriente vehicular y/o peatonal.
- Regular y homogeneizar la velocidad de los vehículos.
- Controlar y ordenar la circulación por carriles y movimientos para rutas distintas.
- Aumentar la seguridad ante siniestros, principalmente choques y atropellos.
- De manera indirecta promueven a la convivencia con los transeúntes y promueven el comercio.

Sin embargo, en los cruces semaforicos se presentan típicamente las siguientes problemáticas:

- Generación de demoras.
- Reducción de velocidades.
- Creación de colas.

Los semáforos, al igual que todos los dispositivos eléctricos han tenido avances tecnológicos desde su invención. Éstos, sin embargo la función muy precisa tienen que es el regular el tránsito vehicular; por lo que los avances tecnológicos han significado en básicamente mejorar la manera en que realizan su función más importante. Debido a las problemáticas típicas que los semáforos generan se han enfocado estos avances en reducir lo más posible este tipo de asuntos.

Los avances tecnológicos en los semáforos de manera principal han sido impulsados por el desarrollo en dispositivos eléctricos y electrónicos de diferentes áreas; como es el caso de las cámaras, computación, sistemas, detectores, sensores, etc. Los semáforos más modernos utilizan detectores magnéticos, de presión, de radar o de inducción para poder controlar el tráfico en tiempo real con base a la demanda. El desarrollo también abstracto en el tema de software ha aportado mucho en la

operación de los semáforos y en la unidad de control con la cual se rige el comportamiento de los semáforos. De aquí han surgido los semáforos accionados por el tránsito, que como se verá, utilizan estas herramientas para satisfacer las demandas del tránsito en tiempo real, manipulando los ciclos de los semáforos, su programación y secuencia de fases.

Mediante combinaciones de avances tecnológicos tanto en hardware como en software se ha logrado tener avances importantes en los semáforos y en la Ingeniería en Tránsito en general, brindando grandes soluciones en la operación de las vialidades al reducir tiempos de espera y favoreciendo a la coordinación de cruces semafóricos.

En la actualidad se manejan principalmente 4 tipos de semáforos: de tiempo fijo, coordinados, semiaccionados y completamente accionados. Donde los semáforos de tiempo fijo representan la inmensa mayoría de los semáforos que se encuentran en las ciudades mexicanas, sin embargo poco a poco ante el constante crecimiento de vehículos se ha popularizado el hecho de invertir en mejoras al tránsito en su operación además de las inversiones típicas en infraestructura vial. Para todos los casos es necesario contar con buena información vial que permita analizar la situación real de los casos en donde se necesiten mejorar las condiciones del tránsito. Se recomendará utilizar el tipo de semáforo que convenga de acuerdo a las situaciones que lo justifiquen, de acuerdo a la cantidad de vehículos, cantidad de peatones, importancia de la calle secundaria, demanda horaria, accidentes, complejidad de los cruces y sus movimientos y fluctuaciones del tránsito a lo largo del tiempo.

En los siguientes puntos se abordarán los 4 tipos de semáforos que se usan en la actualidad, donde se resaltará principalmente su modo de operación, sus beneficios y problemáticas.

1.3.1. Tiempo Fijo

Los semáforos de tiempo fijo son los primeros semáforos que se crearon; éstos tuvieron un auge importante para resolver el control del tránsito, sin embargo con el incremento de la demanda vial, los semáforos de tiempo fijo comenzaron a mostrar carencias para tener un sistema efectivo de fluidez, que hoy en día ya se tienen varias soluciones. En la actualidad se siguen utilizando bastante los semáforos de tiempo fijo en países en vías de desarrollo, sin embargo la teoría ha desarrollado ciertas recomendaciones para la utilización de los semáforos. En el caso de los semáforos de tiempo fijo, se recomienda colocar un semáforo de tiempo fijo cuando se tiene un cruce que no presenta mucha variación en su demanda o en una intersección aislada que no requiera coordinación con algún otro dispositivo de control.

Un semáforo de tiempo fijo opera con una unidad de control, que es la encargada de regir el comportamiento de las luces en los semáforos con base a una programación. Los semáforos de tiempo fijo permiten tener un programa de tiempos y fases que se asigna con base a información vial recopilada previamente. Algunas unidades de control permiten tener programas que varíen con respecto a la hora, para que de esta manera se asigne la mejor programación para ciertos periodos específicos, de acuerdo a la demanda del tráfico.

La gran problemática con los semáforos de tiempo fijo es que para que éstos funcionen siempre de la mejor manera, se tienen que hacer periódicamente aforos para conocer si han cambiado las condiciones del tránsito, para posteriormente reasignar la mejor programación semafórica. En los casos cuando los niveles de servicio sean muy bajos, será posible que instalando semáforos de otro tipo se puedan mejorar las condiciones.

1.3.2. Coordinados

Los semáforos coordinados son aquellos que parten de semáforos de tiempo fijo, pero que dada la cercanía de los cruces que tienen semáforos se ha visto necesario coordinar éstos para que se tenga fluidez en la avenida. Las avenidas que presentan varios cruces a lo largo de su longitud y que

presentan semáforos, en una distancia de máximo 400 metros será prácticamente obligatorio lograr una coordinación entre los mismos para que no se generen demoras excesivas y los vehículos puedan circular sin detenerse.

Para lograr semáforos coordinados se han definido en la teoría 4 sistemas de coordinación principales que ayudan para lograr esta coordinación. Es evidente que éstos varían de acuerdo a la geometría de la avenida, si es de doble sentido, de sus fases, de los volúmenes de las vialidades que cruzan, etc. Dados estos sistemas se han independizado los semáforos coordinados de los de tiempo fijo para estudiarse por aparte, ya que en algunos casos se tienen unidades de control específicas para regular este tipo de semáforos y deben estudiarse por aparte.

En el marco teórico de esta tesis y con el objetivo que se ha propuesto, se ha definido un capítulo exclusivo para la coordinación de semáforos, donde se mencionará todo lo relevante con este tipo de semáforos, desde los tipos de coordinación hasta las herramientas que se cuentan para lograr ellos.

1.3.3. Semiaccionados

Los semáforos semiaccionados utilizan detectores en sólo algunos de los accesos de una intersección para regular el flujo del tránsito en la misma. En este caso la duración de los ciclos y fases varía de acuerdo a la demanda del tránsito, y el control se ajusta continuamente para brindar el servicio. En un cruce operado por semáforos semiaccionados, se le dará prioridad y derecho de paso primordialmente a la avenida principal, y se le dará el paso a la calle secundaria de acuerdo a la demanda que esta última presente.

Para la operación, se le asigna a la avenida principal un tiempo verde mínimo, mismo que puede ser mayor de acuerdo a la demanda vehicular. A su vez se cuenta con un intervalo de despeje de la calle principal, que se asigna para que la intersección quede totalmente despejada después de terminar el tiempo verde; un intervalo inicial para la calle secundaria, que permite que arranquen los vehículos que esperan el verde; un intervalo para los vehículos de la calle secundaria, que permite que los vehículos que arrancan después del intervalo inicial logren pasar por el detector; una extensión máxima para la calle secundaria, que limita la reiniciación del tiempo del intervalo para los vehículos de la calle secundaria; y un intervalo de despeje de la calle secundaria, fijado para determinar la duración del tiempo para despejar la intersección, terminado el verde de la calle secundaria.

En un semáforo semiaccionado se utilizan las variables antes mencionadas para operar los tiempos semafóricos de las intersecciones. Este tipo de semáforos resulta útil cuando se tiene un cruce de una avenida principal con una secundaria y el volumen de la secundaria es bastante menor con respecto a la principal, y presenta variaciones importantes de demanda a lo largo del día. Como ejemplo se puede tener una calle residencial que cruza con una avenida principal, donde la calle residencial presenta demanda principalmente a una hora en la mañana y en la tarde o noche, para este caso será útil un semáforo semiaccionado que permita que los vehículos de la calle residencial tengan verde en aquellos horarios principales de demanda, mientras que en horas valle, donde la demanda en la calle residencial sea prácticamente nula, se tendría siempre verde en la avenida principal, hasta que la secundaria presente demanda.

1.3.4. Completamente Accionados

Los semáforos completamente accionados por el tránsito utilizan detectores en todos los accesos de una intersección para regular el flujo del tránsito en la misma. En este caso la duración de los ciclos y fases varía de acuerdo a la demanda del tránsito, y el control se ajusta continuamente para brindar el servicio. Los semáforos completamente accionados trabajan prácticamente de la misma manera que los semáforos semiaccionados (descritas sus variables anteriormente) aunque con la posibilidad de poder omitir totalmente el paso a un acceso si éste no presenta demanda.

Una intersección compleja o con varias fases (3 o más) se podría solucionar más eficientemente con un control completamente accionado. Para estos casos, los semáforos además de utilizar las variables descritas en el punto anterior, permiten ajustar un intervalo inicial de tiempo para permitirle arrancar a los vehículos; un intervalo de vehículos, que le permite al vehículo alcanzar la intersección desde el detector; un intervalo máximo, que se define por un tiempo máximo del que se puede disponer una demanda continua en cualquiera de las otras fases; y un intervalo de despeje, que permite darle un tiempo a la intersección de despejarse de vehículos.

Este tipo de semáforos resulta muy útil para la operación de intersecciones complejas o de intersecciones de dos avenidas principales con demandas grandes. En México este tipo de semáforos son los que más escasean y la solución que brindan da muy buenos resultados, sin embargo la implementación de los mismos es la más cara económicamente y es por eso que no se ha invertido mucho en este tipo de herramientas.

1.4. TEORÍA DE INTERSECCIONES SEMAFORIZADAS CON TIEMPO FIJO

Los semáforos de tiempo fijo son los más populares y abundantes en las calles. Éstos se instalan en cruces que primeramente necesitan un dispositivo de control para ordenar el paso del tránsito, posteriormente se recomienda este tipo de semáforos para aquellos cruces que tienen una demanda poco variable a través del día. A su vez, los semáforos de tiempo fijo representan la solución más económica para ordenar el tránsito, de aquello se ha popularizado y difundido la teoría de los semáforos de tiempo fijo, donde se define el modo de operar de estos dispositivos.

1.4.1. Definiciones

En esta sección se proveerá, a modo de glosario, las definiciones de los conceptos más importantes que rigen la teoría de las intersecciones semaforizadas con tiempo fijo.

- **Ciclo.-** Es el tiempo total que dura una secuencia completa de todas las indicaciones de señal del semáforo; es decir, del encendido de una de las luces del semáforo o una combinación de ellas.
- **Movimiento.-** Es la maniobra que efectúa un vehículo cuando éste tiene el derecho de paso, este puede ser en grosso modo, hacia adelante, vuelta derecha, vuelta izquierda y vuelta en U o cambio de sentido.
- **Intervalo.-** Es la duración en cualquier división del ciclo donde la luz del semáforo no cambia.
- **Fase.-** Es una fracción del ciclo en donde se asigna el derecho de paso a ciertos vehículos con uno o más movimientos de manera que no sean contrarios, mientras que los demás vehículos son detenidos con una luz roja. Durante un ciclo se tienen dos o más fases, donde se define también convenientemente una secuencia de aparición de dichas fases y que se repite cada vez que el ciclo comience de nuevo.
- **Tiempo de Todo Rojo.-** Es el tiempo que dura cuando se tienen todas las luces del semáforo en color rojo, generalmente con el fin de terminar de despejar los vehículos que hayan permanecido dentro de la intersección. Éste se utiliza en cruces con vialidades anchas y tiene una duración típica de 1 a 3 segundos, de acuerdo a la geometría del cruce.

1.4.2. Tiempos de un Semáforo

Los tiempos que se le asignan a un semáforo pueden definirse por métodos manuales o utilizando software, siendo éste último el que se utiliza en su mayoría. El ejemplo más popular de software sería

el Highway Capacity Software (HCS+), diseñado con la base de los métodos manuales. A pesar de que los softwares sean útiles y reduzcan trabajo, los métodos manuales proveen certeza y reducción de redundancia cuando se utilizan, por lo que es siempre importante conocer los métodos manuales primeramente a la utilización de softwares.

Para el cálculo de los tiempos de un semáforo la variable que será más importante tomar en cuenta será la demora, donde se buscará siempre hallar una solución que presente ésta en su mínimo, comparado con otras posibles soluciones. Por lo tanto esto es algo que de antemano deben considerarse y tener siempre en mente, ya que esto definirá la eficacia de los tiempos de un semáforo.

Para asignar los tiempos de un semáforo primeramente tienen que definirse las posibles fases que formen parte del ciclo. Para reducir demoras es conveniente mantener corto el número de fases y agrupar la mayor cantidad de movimientos dentro de una fase. La demanda de cada movimiento es lo que va a restringir el agrupamiento de los movimientos de las fases y posteriormente al tiempo asignado para cada una de ellas. Dicho aquello, parecería lógico que el tiempo que se le asigne a cada fase sea el proporcional al ciclo igual a la proporción de la demanda vehicular de la intersección.

Existen diversas fórmulas para el cálculo de los tiempos de un semáforo. Las más reconocidas vienen respaldadas por las fuentes: Manual of Traffic Signal Design de James H. Kell y Fullerton, del Institute of Transportation Engineers, New Jersey; Traffic Signals Settings, de F.V. Webster, de Road Research Technical Paper, Londres; y Traffic Signals: Capacity and Timing Analysis, de Rahmi Akcelik, de Australian Road Research Board.

- Intervalo de cambio de fase.- Este tiempo es aquel que se asigna para informar a los conductores de un cambio en la asignación del derecho de paso en la intersección. Por lo tanto, este intervalo está definido por la suma del tiempo del semáforo en ámbar y el tiempo de todo rojo.
 - La duración del ámbar se define por la suma de un tiempo de percepción-reacción del conductor (por lo general 1 segundo) y el cociente de la velocidad de aproximación de los vehículos con el doble de la tasa de deceleración (por lo general 3.05 m/s^2).
 - La duración del tiempo de todo rojo se define como la suma del ancho de la intersección (W) con la longitud del vehículo (L), esto dividido entre la velocidad de aproximación de los vehículos. Este cálculo debe realizarse para cada fase, ya que podría cambiar el ancho de la intersección correspondiente y por ende el tiempo de todo rojo. Lo descrito anteriormente se ilustra a continuación en la figura 1.1.

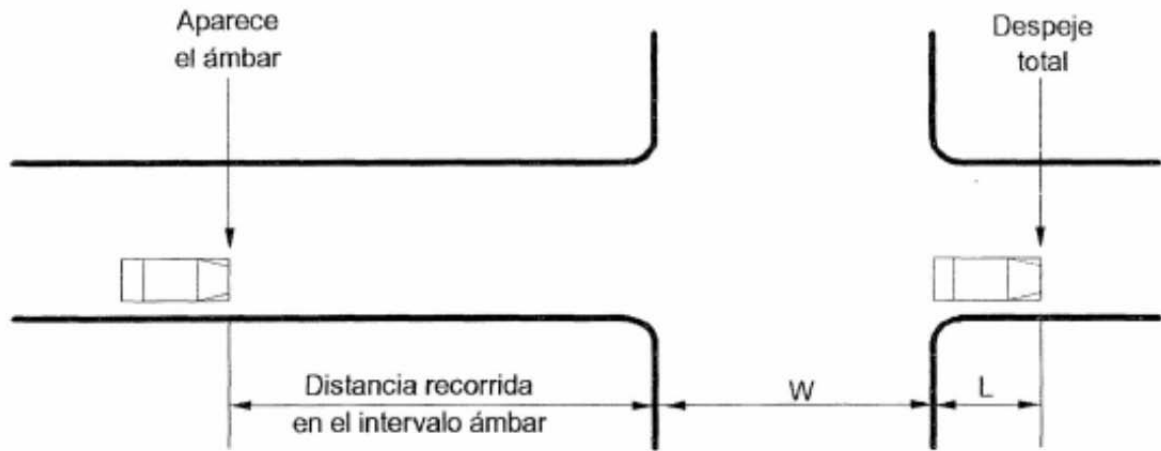


Figura 1.1 Descripción Gráfica del Intervalo de Cambio de Fase
Fuente: Ingeniería de Tránsito, Cal y Mayor, 1994

- Longitud del ciclo.- Se llegó a una fórmula determinada con base en observaciones de campo y simulación de amplias condiciones de tránsito, demostrando que la demora mínima de todos los vehículos en una intersección con semáforo se obtiene con una longitud de ciclo óptimo. Dicho cálculo está en función del tiempo total perdido por ciclo (L), el número de fases (ϕ) y el máximo valor de la relación entre el flujo actual y el flujo de saturación para el movimiento crítico de la fase i (Y_i).

$$C_o = \frac{1.5L + 5}{\phi \left(1 - \sum_{i=1} Y_i \right)}$$

Fórmula 1.1 Cálculo de la Longitud del Ciclo
Fuente: Ingeniería de Tránsito, Cal y Mayor, 1994

Este cálculo corresponde al del tiempo óptimo del ciclo, por lo que no necesariamente tiene que asignarse este tiempo al ciclo en cuestión. Por lo general se redondea el valor calculado en un valor que no varíe en reducciones del 25% o ampliaciones del 50% como máximo. De esta manera las demoras no aumentarían más de acuerdo a la demora mínima (la que brinda el ciclo óptimo).

- Vehículos equivalentes.- Para cada intersección se presentan distintos tipos de vehículos, se tienen automóviles, camiones, autobuses de pasajeros, etc. Esto influye para el desempeño de una intersección, de aquello se ha definido un factor de equivalencia, que sirve como un factor de ajuste. Este factor se define con base a los porcentajes de camiones, autobuses y vehículos recreativos en cada acceso, junto con las equivalencias en automóviles para cada tipo de vehículo. Por ejemplo para los autobuses se tendría una equivalencia de 1.4 a 2.0 automóviles por autobús. Con base en ello y un promedio pesado, se determina un factor que servirá para definir vehículos equivalentes en el análisis.

Por otra parte se presenta un caso similar con los movimientos que dan vuelta, donde se tiene que un vehículo tarda más tiempo en dar una vuelta que en seguir de frente, de aquello se asigna, de manera muy similar, un factor que varía de 1.4 a 1.6 para vueltas izquierdas y de 1.1 a 1.4 para vueltas derechas. Cuando se presentan volúmenes horarios de máxima demanda, éstos deben ser convertidos

a tasas de flujo, a través del factor de la hora de máxima demanda, por lo general este valor es de 0.95.

- Flujo de saturación y tiempo perdido.- El concepto de flujo de saturación parte del hecho de cuando un semáforo cambia a verde, el paso de los vehículos que cruzan la línea de alto se incrementa rápidamente hasta llegar a una tasa denominada “flujo de saturación”, que permanece constante hasta que hayan avanzado todos los vehículos o hasta que termina el tiempo verde. Esta tasa es menor con los vehículos al frente de la cola, dado el tiempo de percepción del cambio y el tiempo en acelerar, esto de manera similar cuando se ha iniciado el intervalo de cambio de fase, puesto que los vehículos reducen su velocidad o buscan detenerse. Es precisamente en los instantes de inicio y fin de la luz verde donde se tiene cierto tiempo perdido, consecuencia natural de reacción por parte de los conductores. El flujo de saturación en la Ciudad de México, de acuerdo a un dato de Traffic Flow on Transportation Networks (Gordon F. Newell, de The MIT Press, en Massachusetts), se ha calculado de 1,800 vehículos por hora de luz verde por carril. El flujo de saturación se entiende mejor de acuerdo al siguiente diagrama:

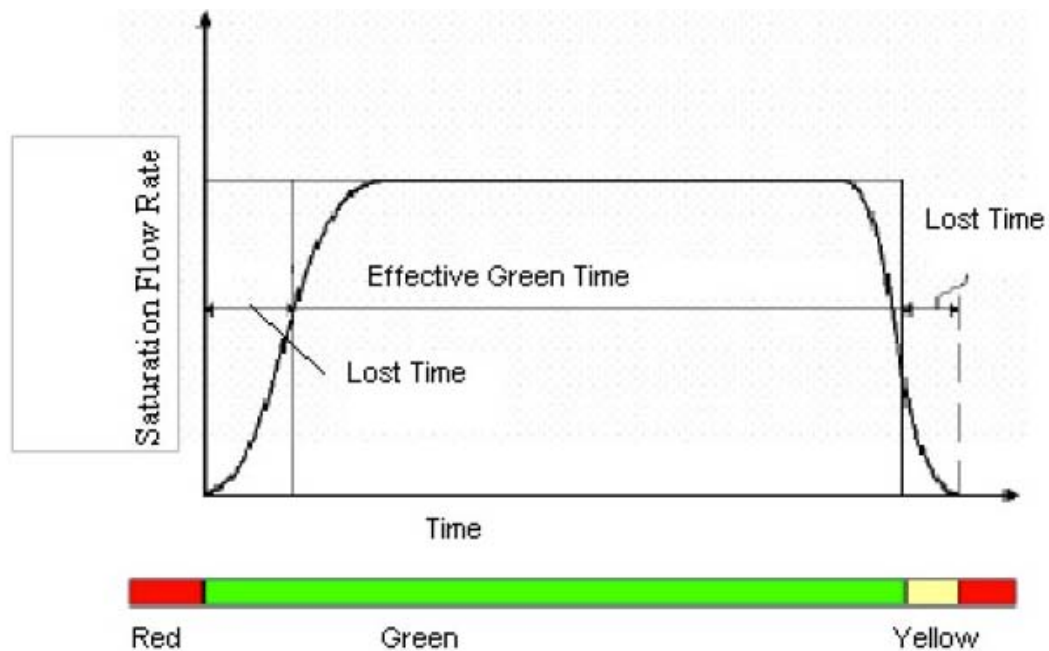


Figura 1.2 Flujo de Tránsito en el Tiempo Verde para un Acceso de una Intersección Saturada

Fuente: Canadian Journal of Transportation, 2009

Para más detalles del flujo de saturación se ha asignado el capítulo 1.4.3 para profundizar sobre este tema.

- Asignación de tiempos verdes.- Antes que nada se tiene un tiempo de verde efectivo total, que es aquel tiempo de verde total de la intersección, considerando todos sus accesos. Este valor equivale a la duración del ciclo menos el tiempo total perdido por ciclo (este valor es igual la suma de los tiempos en ámbar y todo rojo para cada fase). Posterior a eso se asigna un tiempo de verde para cada fase, donde se distribuye proporcionalmente el tiempo verde efectivo total de acuerdo al valor máximo de la relación entre el flujo actual y el flujo de saturación para cada fase del ciclo. De esta manera se llega a asignar teóricamente la mejor programación semafórica para cada cruce en particular.

1.4.3. Modelo del Flujo de Saturación

El flujo de saturación es considerado como una medida de desempeño para niveles macro de tránsito. Éste es a su vez un indicador de la capacidad potencial de una intersección operando en condiciones teóricamente ideales. Como se mencionó anteriormente, el flujo de saturación ilustra el comportamiento de los vehículos al cambio de luz roja a verde, donde se tiene un lapso corto de tiempo de reacción a la luz verde por parte de los conductores, en el cual se alcanza una tasa máxima de cruce conformada por los vehículos que van cruzando la intersección, a esta tasa de flujo de saturación se le comienza un tiempo efectivo de verde, en donde los vehículos conservan esta tasa máxima de servicio (flujo de saturación). Al terminar este periodo y cuando el semáforo cambia a luz ámbar, la reacción natural de los conductores implica por lo general disminuir la velocidad y detenerse justo antes de la línea de alto. En este caso el tiempo perdido es aquel que se pierde al tener una tasa menor al cambio de la luz ámbar. Estos conceptos se aclaran mejor observando el siguiente diagrama en la figura 1.3.

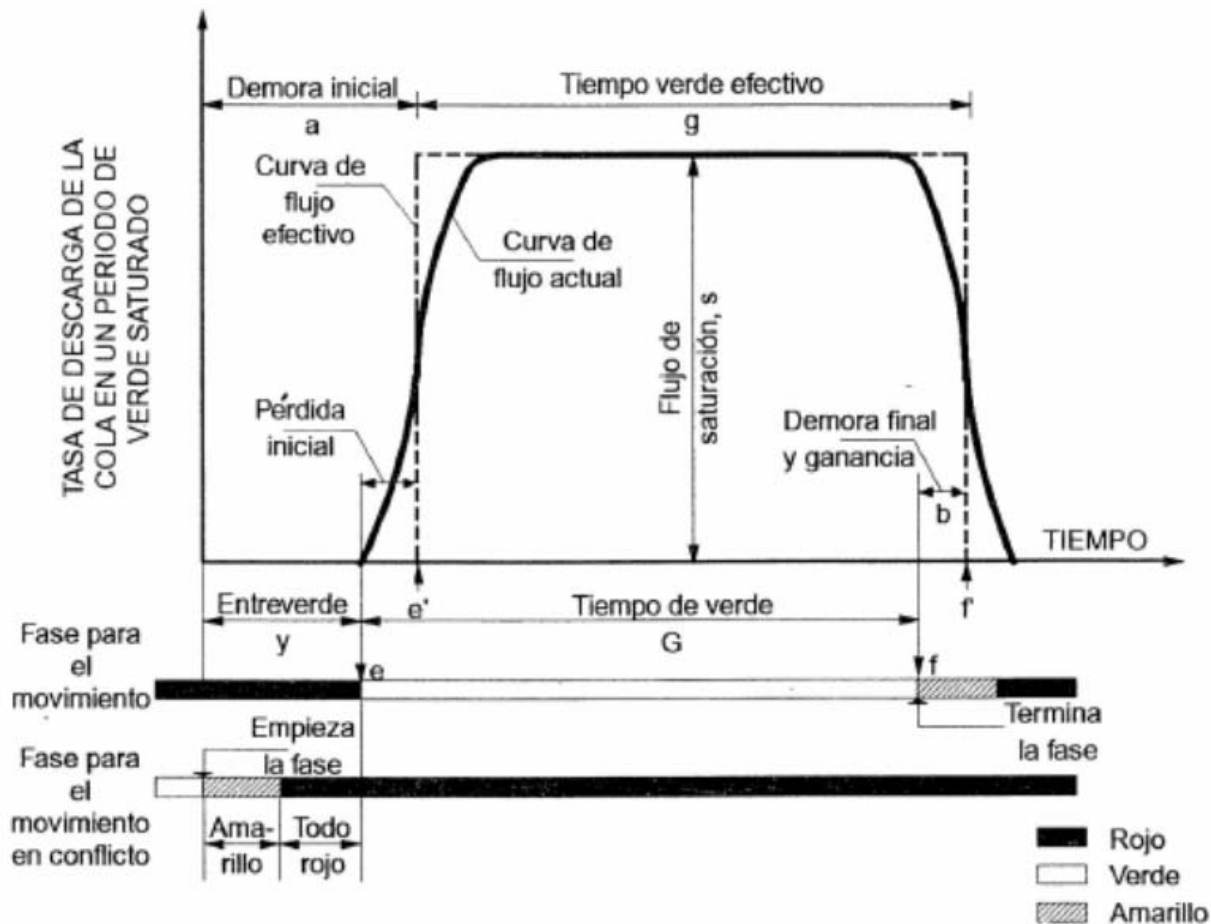


Figura 1.3 Modelo del Flujo de Saturación
Fuente: Ingeniería de Tránsito, Cal y Mayor, 1994

El flujo de saturación se calcula por medio de un rectángulo representativo de la curva anterior, al que se pueden tomar dimensiones. Para esto se necesita involucrar el concepto de tiempo verde efectivo y tiempo perdido. El tiempo perdido es aquel que va del comienzo del verde, a un punto donde los

vehículos alcanzan la mitad de su velocidad de flujo libre más el tiempo en donde los vehículos van a la mitad de su velocidad de flujo libre al final del tiempo verde y comienzo del rojo.

Por lo general las variables involucradas en el flujo de saturación se calculan en campo. Un artículo de “Canadian Journal of Transportation” recuerda que se tienen tres métodos principales para el cálculo del flujo de saturación. Uno es “The Road Note 23 Method (1963)”, que consiste en llevar conteos clasificados de vehículos cruzando la línea de alto, en intervalos de 6 segundos, durante el periodo verde y ámbar en condiciones saturadas. Se recomienda para este caso promediar 30 ciclos para cada acceso. Otro método es “The Average Headway Method”, que es una alternativa que requiere la información de los intervalos entre los autos cuando cruzan la línea de alto (figura 1.4), para ello se utilizan bumpers o parachoques en la parte de atrás de los vehículos. Otro método es el de “Regresiones Lineales Múltiples”, que utiliza información de conteo manipulándola con métodos estadísticos complejos, en este caso el tiempo de verde se divide en tres periodos; el primero cuando se muestra la luz verde y se alcanza el flujo de saturación; el segundo durante el estado saturado y el tercero durante la luz ámbar.

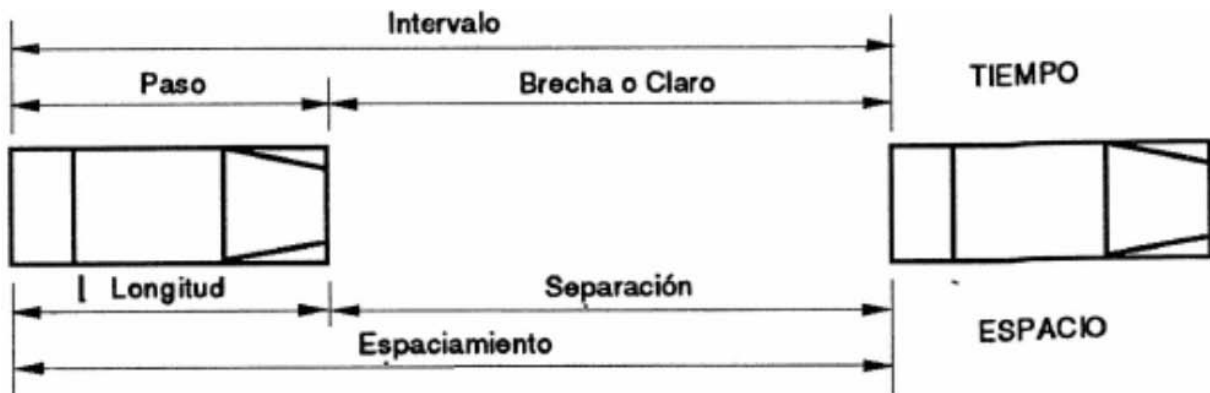


Figura 1.4 Definiciones en Tiempo y Espacio entre dos Vehículos
Fuente: Ingeniería de Tránsito, Cal y Mayor, 1994

1.4.4. Factor de Progresión y Tipo de Llegada

Para analizar la calidad de la progresión de los vehículos en una vialidad con semáforos, se han definido los conceptos de tipo de llegada y factor de progresión con la finalidad de parametrizar la progresión del flujo vehicular en una vialidad.

Los tipos de llegada se ha clasificado en 6 tipos, donde varían de acuerdo a distintas condiciones, estos tipos de llegada tienen las siguientes características:

- Tipo de llegada 1 “Muy Mala”.- Ocurre en una calle de doble sentido en donde uno de los dos sentidos no tiene buena progresión, en este caso los semáforos se tienen coordinados y se encuentran a menos de 500 metros de distancia.
- Tipo de llegada 2 “Desfavorable”.- Es muy similar al tipo de llegada 1, pero con condiciones menos drásticas, en este caso los semáforos se encuentran entre 500 y 1,000 metros.
- Tipo de llegada 3 “Llegadas Aleatorias”.- Se presenta cuando se tienen semáforos en intersecciones a más de 1,000 metros de distancia y éstas pueden ser aisladas o tener cierta coordinación.

- Tipo de llegada 4 “Favorable”.- Ocurre para avenidas que tienen semáforos entre 500 y 1,000 metros de distancia. Se presenta coordinación en los semáforos para uno de dos sentidos en una vialidad.
- Tipo de llegada 5 “Altamente Favorable”.- Se presenta una coordinación en los semáforos con distancias menores a 500 metros.
- Tipo de llegada 6 “Excepcional”.- Ocurre típicamente en vialidades de un solo sentido y con semáforos a menos de 250 metros de distancia. Este caso es el típico para zonas comerciales con calles con alta densidad.

Uno de los criterios para evaluar la progresión vehicular en una vialidad es el llamado factor de progresión, que se comporta como un factor de ajuste. Una buena progresión se basa en la llegada de vehículos durante el intervalo verde. Este factor se calcula matemáticamente con una fórmula en función de: la fracción del tiempo de verde por ciclo, un factor de llegada grupal durante el tiempo verde, y la proporción de todos los vehículos que llegan en verde. El factor de progresión se utiliza posteriormente para los cálculos de la demora uniforme, donde al ser mayor, la demora será mayor.

Con base en los tipos de llegada se han asignado factores de progresión para cada tipo. Éstos se pueden tabular con base a la proporción del tiempo verde, tal como se muestra en la tabla 1.1.

Tabla 1.1 Factores de Progresión para Diferentes Tipos de Llegada
Fuente: HCM, Transportation Research Board, 1994

EXHIBIT 15-5. PROGRESSION ADJUSTMENT FACTORS FOR UNIFORM DELAY CALCULATION

Green Ratio (g/C)	Arrival Type (AT)					
	AT 1	AT 2	AT 3	AT 4	AT 5	AT 6
0.20	1.167	1.007	1.000	1.000	0.833	0.750
0.30	1.286	1.063	1.000	0.986	0.714	0.571
0.40	1.445	1.136	1.000	0.895	0.555	0.333
0.50	1.667	1.240	1.000	0.767	0.333	0.000
0.60	2.001	1.395	1.000	0.576	0.000	0.000
0.70	2.556	1.653	1.000	0.256	0.000	0.000
f_{PA}	1.00	0.93	1.00	1.15	1.00	1.00
Default, R_p	0.333	0.667	1.000	1.333	1.667	2.000

Notes:
 $PF = (1 - P)f_{PA}/(1 - g/C)$.
 Tabulation is based on default values of f_p and R_p .
 $P = R_p * g/C$ (may not exceed 1.0).
 PF may not exceed 1.0 for AT 3 through AT 6.

El factor de progresión y tipo de llegada son parámetros ampliamente conocidos e importantes, ya que han sido parte fundamental de la ingeniería de tránsito que hoy día se conoce. Los avances tecnológicos e informáticos han revolucionado la manera de evaluar las condiciones del tránsito, pero éstas sin embargo tuvieron que tomar esta teoría como punto de partida para su desarrollo.

1.5. CAPACIDAD Y NIVELES DE SERVICIO EN INTERSECCIONES SEMAFORIZADAS

La capacidad y niveles de servicio son herramientas que permiten evaluar el desempeño de una intersección semaforizada. Se verá como la capacidad se define matemáticamente, mientras los niveles de servicio se definen de una manera más subjetiva y sencilla, orientada a la experiencia del usuario. Ambos casos son ampliamente usados, la capacidad por ingenieros de tráfico principalmente y los niveles de servicio como una interfaz más sencilla, pero muy práctica para analizar el desempeño de un cruce.

La capacidad en una intersección semaforizada se define en igual número de veces que los accesos que ésta presente. Esta capacidad indica la tasa máxima de vehículos que pueden cruzar la intersección en un lapso de 15 minutos y usualmente se maneja en vehículos por hora. La capacidad varía por cada cruce, de acuerdo al movimiento (vuelta izquierda, derecha, adelante), estacionamientos, seguridad, autobuses, carriles, etc., además de esto la capacidad se ve afectada por las condiciones del semáforo; por lo tanto, la manera más efectiva de calcular la capacidad en una intersección es midiéndola en campo. Para el análisis de una intersección se utiliza habitualmente la relación volumen-capacidad (v/c), que presenta la relación del volumen o flujo que transita en un movimiento, contra la capacidad definida. En algunos casos se utiliza la relación de volumen contra flujo de saturación para analizar grupos de carriles, determinado en vehículos por hora de luz verde, que brinda un parámetro para evaluar el desempeño para una intersección. Para evaluar en conjunto a una intersección se utiliza el concepto “grado de saturación crítico”, donde se toma el acceso o grupo de carriles críticos como aquellos que tienen la relación de flujo más alta para cada fase.

Los niveles de servicio en las intersecciones semaforizadas se definen de una manera más sencilla que la capacidad, donde se determinan éstos de acuerdo a las demoras o al tiempo que está un vehículo esperando para cruzar una intersección. El HCM define el desempeño de una intersección semaforizada con literales, de acuerdo a la siguiente relación con las demoras en segundos por vehículo.

Tabla 1.2. Niveles de Servicio en Intersecciones Semaforizadas
Fuente: HCM, Transportation Research Board, 1994

Nivel de Servicio	Demora (segundos / vehículo)
A	< 5
B	>5.1 y <15
C	>15.1 y <25
D	>25.1 y <40
E	>40.1 y <60
F	>60

Con base en lo anterior se dice que un cruce está trabajando de manera relativamente óptima si el nivel de servicio se encuentra entre A y C, si éste está en D es posible que el desempeño del cruce empeore y se llegue a niveles muy negativos como la E y la F, que significaría que el servicio de la intersección está en un mal estado y las condiciones del cruce están siendo rebasadas por la demanda. En estos casos pueden tomarse medidas para mejorar el nivel de servicio, donde se podría abrir un abanico de opciones sin concretar alguna como la mejor solución. En cada caso será necesario llevar un análisis profundo de la intersección para ver qué es lo que realmente está sucediendo y proponer las soluciones más adecuadas.

CAPÍTULO 2

COORDINACIÓN DE SEMÁFOROS

2.1. VELOCIDAD DE RECORRIDO

Los conductores son aquellos elementos que rigen la velocidad a la que se traslada su vehículo, evidentemente la velocidad a la que el conductor desee trasladarse podría estar limitada por las características de los vehículos. Sin embargo, en el ámbito urbano, generalmente se considera a los automóviles particulares que su velocidad está únicamente regida por el usuario bajo las mismas características del vehículo; los camiones, por ejemplo tienen otras limitantes que hacen que la velocidad además de estar controlada por el usuario esté ésta restringida por las características físicas del vehículo que se conduce. De esta manera se enfoca en los usuarios para poder analizar la velocidad a la que viaja un vehículo dentro de una vía.

La velocidad de los vehículos se estudia de diferentes maneras: se tiene la velocidad de punto, que es aquella que se presenta en un vehículo en particular en un tiempo definido y un punto preciso; la velocidad media temporal, que representa la media aritmética de las velocidades de punto de varios vehículos; y la velocidad media espacial, que es aquella media aritmética de las velocidades de punto de los vehículos dentro de un tramo definido de vía. Además de aquellas se tiene la velocidad de recorrido, velocidad de marcha y velocidad de proyecto, que se utilizan para casos más precisos de análisis. La velocidad de recorrido es aquella que se obtiene de dividir la distancia total recorrida entre el tiempo total, dentro de una ruta en particular; la velocidad de marcha se calcula dividiendo la distancia recorrida entre el tiempo en que estuvo en movimiento el vehículo, o dividiendo la distancia recorrida entre la diferencia del tiempo de recorrido y el tiempo que estuvo el vehículo detenido; y la velocidad de proyecto es aquella velocidad máxima que se ha asignado para que los vehículos puedan circular por una vía con todos los criterios de seguridad y bajo las mejores condiciones ambientales, geométricas y constructivas.

Para esta tesis la velocidad de recorrido será aquella de interés para desarrollar el tema propuesto. La velocidad de recorrido se utiliza ampliamente para el análisis del desempeño de las vialidades, generalmente se toma como dato principal a la media de varias velocidades de recorrido para acercarse más a analizar la vía de una manera general y promedio. Ésta permite tener a la disposición el tiempo de demoras que resulta muy útil para determinar la fluidez de los corredores.

Los estudios para el cálculo de la velocidad de recorrido involucran principalmente la recopilación de los tiempos de recorrido de varios vehículos, para ello resulta útil detectar los puntos dentro del corredor que presentan demoras, mismas que pueden ser ocasionadas por cantidad de vehículos, accidentes, entronques, semáforos o demás. Al hacer estudios de tiempos de recorrido también se suelen hacer estudios para determinar posteriormente la velocidad de marcha; que en conjunto con la velocidad de recorrido permite detectar qué tanto intervienen las demoras para el desempeño del corredor.

2.2. CAPACIDAD Y NIVELES DE SERVICIO EN ARTERIAS SEMAFORIZADAS

Con base a lo descrito por el análisis del flujo de saturación se tiene por entendido que una vía funciona mejor cuando la capacidad de la misma no haya sido rebasada. La capacidad sería aquella que permite el paso de un número máximo de vehículos en un intervalo definido de tiempo, de acuerdo a la geometría e infraestructura vial, dispositivos de control y tránsito. En términos generales una vialidad funciona a un buen servicio cuando el flujo es menor a la capacidad, de lo contrario se presentan

congestionamientos y demoras que conllevarían a tiempos extraordinarios para el cual la vía fue diseñado.

Aun cuando se presenten flujos inferiores a la capacidad de las vías, se presentan situaciones en donde la velocidad del flujo no es la óptima para el usuario y éste no considere como ideal la circulación en esos casos, ya que a fin de cuentas pueden presentarse cambios en la velocidad. Por estos casos es que se hacen estudios de capacidad vial que permiten evaluar cuantitativamente la suficiencia de la vía y la calidad de la misma.

En el diseño de las vialidades se toma en cuenta la capacidad que vayan a requerir las vías en el presente y en el futuro. Esto significa que en caso que se pronostique un incremento de tránsito para una vialidad en el futuro, ésta vía llegará a un punto donde la calidad de su servicio se vea deteriorado. La falta de seguimiento de las vías es lo que provoca que se llegue a un futuro en donde la capacidad de ellas sea inferior a la de un sistema que tiene una demanda incrementada.

Para determinar la capacidad de una vía es necesario utilizar un modelo probabilístico ya que ésta puede cambiar y no ser exacta. Para esto se utilizan ciertas condiciones que en conjunto describen la capacidad de la vialidad. Una de estas características es la infraestructura vial, que engloba la geometría, superficie de rodamiento, entronques, salidas, incorporaciones, carriles, etc; se toman en cuenta también los dispositivos o señalamientos para el control del tránsito y a la distribución del tránsito en el tiempo y espacio junto con su composición (camiones, transporte público, automóviles).

Los semáforos se consideran como dispositivos de control que afectan la capacidad de las vías, éstos junto con otros dispositivos de control o regulación de tránsito hacen que la circulación sea discontinua, a diferencia de vialidades con circulación continua que no tengan dispositivos, elementos o señalización para regular el tránsito.

De acuerdo a las condiciones presentes en las vías y sus diferentes presentaciones se origina el concepto de niveles de servicio, siendo un parámetro para evaluar el desempeño de las vías. Los niveles de servicio consideran las condiciones de la teoría, principalmente los tiempos de recorrido y velocidades, y también consideran la experiencia de los usuarios, como la facilidad para cambiar de carril, visibilidad, seguridad, etc. Para el cálculo de los niveles de servicio se toman las variables directas de velocidad, tiempos, volumen y tránsito y también se consideran las variables determinadas por la vía en estudio, que sería ancho de carriles, distancia lateral, pendientes, terreno, etc.

La idea de los niveles de servicio fue propuesta originalmente en el Highway Capacity Manual (HCM), donde se definieron las literales de la A a la F para evaluar el desempeño de una vía en diferentes circunstancias, donde la A es la mejor puntuación o la más favorable, donde no se posee ninguna afectación en el servicio por alguna agente externo, y F la peor, donde se forman colas, la capacidad queda superada por la demanda y se tienen velocidades muy bajas. Además de aquellos valores, se tienen valores intermedios de la B a la E, donde lo que por lo general se busca es tener vías con niveles de servicio de la A a la C. Los niveles de servicio se utilizan para cada situación en particular, por ejemplo para el caso de carreteras se tiene un nivel de servicio y así como un nivel de servicio para arterias, semáforos, peatones, autopistas y rampas, donde para obtener la literal del nivel de servicio se han propuesto tablas por el HCM para cada paso particular y con unidades de medidas específicas para cada caso.

En un corredor o una arteria urbana se tiene como medida de eficiencia para los niveles de servicio la velocidad media de recorrido, en kilómetros por hora. Para determinar el nivel de servicio se necesita primero obtener la velocidad a flujo libre de la vía. Para ello se necesita primero detectar que tipo vía urbana es la que se analiza con base a su cantidad de semáforos a lo largo de la calle, tal como se ve en la tabla 2.1:

Tabla 2.1. Densidad de Semáforos por Tipo de Calle Urbana

Fuente: HCM, Transportation Research Board, 1994

Tipo de Calle Urbana	Default (semáforos / kilómetro)
I	0.5
II	2
III	4
IV	6

(Referencia: Exhibit 10-6. HCM)

Una vez detectado el tipo de vía urbana, se procede a ver cuál es la velocidad default para la misma, como se muestra a continuación:

Tabla 2.2 Velocidades de Flujo Libre por Tipo de Calle Urbana

Fuente: HCM, Transportation Research Board, 1994

Tipo de Calle Urbana	Default (kilómetros / hora)
I	80
II	65
III	55
IV	45

(Referencia: Exhibit 10-5. HCM)

Con el dato de la velocidad a flujo libre (VFL) se puede ahora determinar el nivel de servicio para la vía, que corresponde a lo siguiente:

Tabla 2.3. Niveles de Servicio en Calles Urbanas

Fuente: HCM, Transportation Research Board, 1994

Nivel de Servicio	Velocidad promedio (km / hr)	Descripción
A	$\geq 90\%$ VFL	Los vehículos no tienen impedimento para maniobrar sobre su trayecto y las demoras en los semáforos es mínima.
B	$< 90\%$ VFL y $\geq 70\%$ VFL	Los vehículos tienen pocos impedimentos para maniobrar en el tráfico y las demoras en los semáforos no es significativa.
C	$< 70\%$ VFL y $\geq 50\%$ VFL	La facilidad para maniobrar en el tráfico es ligeramente más complicado que en B, se presentan colas y las demoras en los cruces incrementa.
D	$< 50\%$ VFL y $\geq 40\%$ VFL	En este caso, si se incrementa un poco la cantidad de vehículos empeora sustancialmente las demoras y reduce la velocidad. Se presenta mala progresión y programación semafórica, además de grandes volúmenes.

E	$< 40\% \text{ VFL y } \geq 33\% \text{ VFL}$	Se presentan demoras sustanciales y velocidades bajas, esto en combinación con una mala progresión, alta densidad de semáforos, mala programación de semáforos y demoras grandes en cruces importantes.
F	$\geq 33\% \text{ VFL}$	Presenta velocidades muy lentas y tiene gran peso la congestión en intersecciones críticas, presentando largas colas, grandes volúmenes y altas demoras.

(Referencia: Capítulo 10-5. HCM)

2.3. SISTEMAS DE COORDINACIÓN

Con el objetivo de dar fluidez a las arterias semaforizadas, se busca coordinar los semáforos para reducir las demoras en su máximo. Para ello se han desarrollado sistemas de coordinación, que se basan en diferentes argumentos y tienen diferentes y precisas situaciones de empleo.

Existen cuatro sistemas de coordinación para los semáforos de tiempo fijo, mismos que pueden estar sujetos a un control maestro mediante cables o radios y que emplean motores de sincronización, de inducción o dispositivos electrónicos de tiempo.

- Sistema Simultáneo

Es un sistema que resulta útil para intersecciones cercanas o cuando se tienen condiciones muy pesadas de tránsito, ya que éstos muestran la misma indicación en el semáforo al mismo tiempo. En su modo de empleo, la velocidad de progresión entre las intersecciones se calcula como la distancia de las intersecciones sobre la duración del ciclo de los semáforos, donde se recomienda que éste último sea el mismo. Este sistema utiliza un solo control que rige al grupo de semáforos que se coordina.

- Sistema Alternado

Este sistema se enfoca más en los grupos de vehículos que transitan por una vialidad, donde se busca que el grupo vaya avanzando de manera continua por las intersecciones. En este caso la velocidad de progresión se calcula de manera similar al sistema simultáneo pero multiplicando la misma por 2, que es a esa velocidad a la que deben circular los vehículos para mantenerse dentro de la coordinación. Este sistema es útil cuando no se tiene tránsito tan intenso y cuando las cuadras son similares. Este sistema puede ser operado por un solo control o por controles individuales.

- Sistema Progresivo Simple o Limitado

Este sistema permite la coordinación de semáforos por tanteo al manipular el desfase de los ciclos de los semáforos. En este caso también se pueden tener ciclos diferentes y con tiempos de verde diferente, sin embargo siempre permanecen constantes. Se busca en este caso favorecer a los grupos de vehículos que si circulan a una velocidad fija mantienen ondas verdes en su paso por los semáforos.

- Sistema Progresivo Flexible

El sistema progresivo flexible sería el que brinda mejores resultados con comparación con los otros sistemas. Este mantiene la duración de los ciclos de los semáforos iguales y varía los tiempos de verde dentro del ciclo para lograr beneficiar a los vehículos que vayan transitando. En este caso se hacen también desfasamientos en los ciclos semafóricos aunque se pueden hacer de manera dinámica, de acuerdo a las condiciones viales e incluso variarlos con respecto al horario para satisfacer las necesidades del sentido de mayor demanda. El resultado sería una arteria coordinada en donde los vehículos podrán encontrar tiempos verdes prácticamente en su totalidad si éstos mantienen una velocidad constante. Este sistema además puede ser muy útil cuando sean variables las distancias entre cuadras e intersecciones. Por lo general se busca favorecer a los vehículos que transiten en el sentido de mayor demanda y cuando la hora cambie, de igual manera se seguiría favoreciendo a aquellos que

circulen por el sentido de mayor demanda. En este sistema se utiliza un control maestro que supervisa a las intersecciones mediante señales de radio o líneas telefónicas.

2.4. DIAGRAMAS ESPACIO-TIEMPO

Un diagrama de espacio-tiempo es una herramienta visual que permite ver el comportamiento de los vehículos a lo largo de un corredor. Se tiene un eje horizontal que representa el tiempo y un eje vertical que representa la longitud del corredor, en este último se localizan las intersecciones con semáforo, donde horizontalmente se representa gráficamente la programación semafórica de ese cruce y pueden verse también los desfases de los ciclos. En algunos casos se invierten los ejes, teniendo el eje del tiempo en el sentido vertical y el eje horizontal para la variable “espacio”, esto únicamente por nomenclaturas, en esta tesis se manejará siempre el eje horizontal como el eje del tiempo y el vertical como el eje de espacio. Comprendidos en estos ejes se grafican los vehículos en su trayecto por el corredor con una línea, donde la pendiente representa la velocidad, así que cuando ésta permanece horizontal significa que el vehículo se ha detenido por completo, por lo general en un semáforo en rojo. A continuación se muestra un ejemplo de un diagrama espacio-tiempo en la calle de 1st Atlanta en Moscow, Idaho, EU (obtenido vía internet en el portal de la página de la Universidad de Idaho en Estados Unidos).

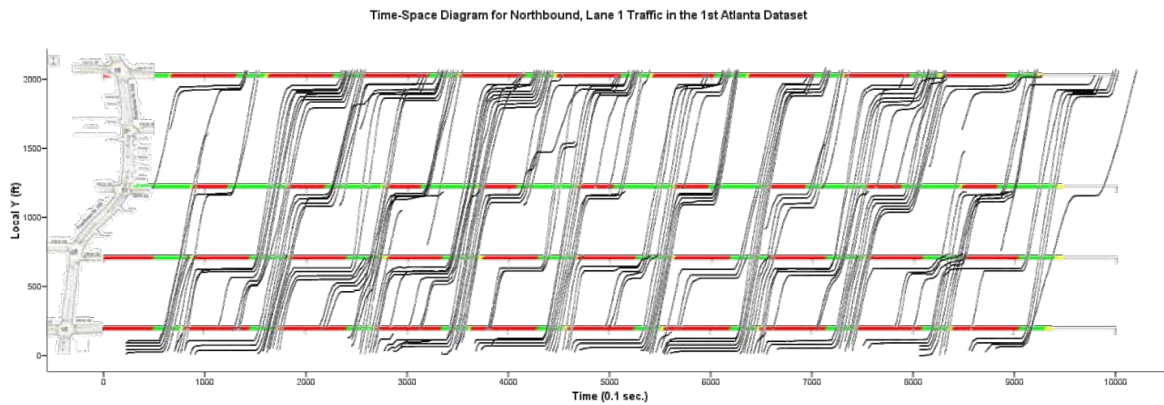


Figura 2.1 Ejemplo de Diagrama Espacio-Tiempo
Fuente: University of Idaho, sin fecha

Los diagramas espacio-tiempo son muy útiles para visualizar la coordinación de los semáforos, por ejemplo en la imagen mostrada anteriormente puede verse como se tiene una mala coordinación de semáforos, esto se ve por la cantidad de líneas horizontales, de hecho puede verse también el incremento de colas, que se nota cuando se tienen varias líneas horizontales, apiladas una sobre la otra.

Por otra parte se pueden tener diagramas espacio-tiempo que muestren el comportamiento de un corredor en ambos sentidos, de manera que se forman “x”. Con aquello se intenta coordinar ambos sentidos, donde resulta fácil para corredores que presentan cruces similares para ambos sentidos y movimientos iguales (vueltas izquierdas, derechas, así como de las calles que cruzan). Si no se presentan estas condiciones será muy complicado lograr una coordinación exacta, aunque siempre será posible llegar a un óptimo que beneficie a ambos sentidos. A continuación se muestra una imagen que ilustra lo dicho anteriormente, obtenida del “Traffic Signal Timing Manual”, del sitio web del FHWA (Federal Highway Administration) del U.S. Department of Transportation.

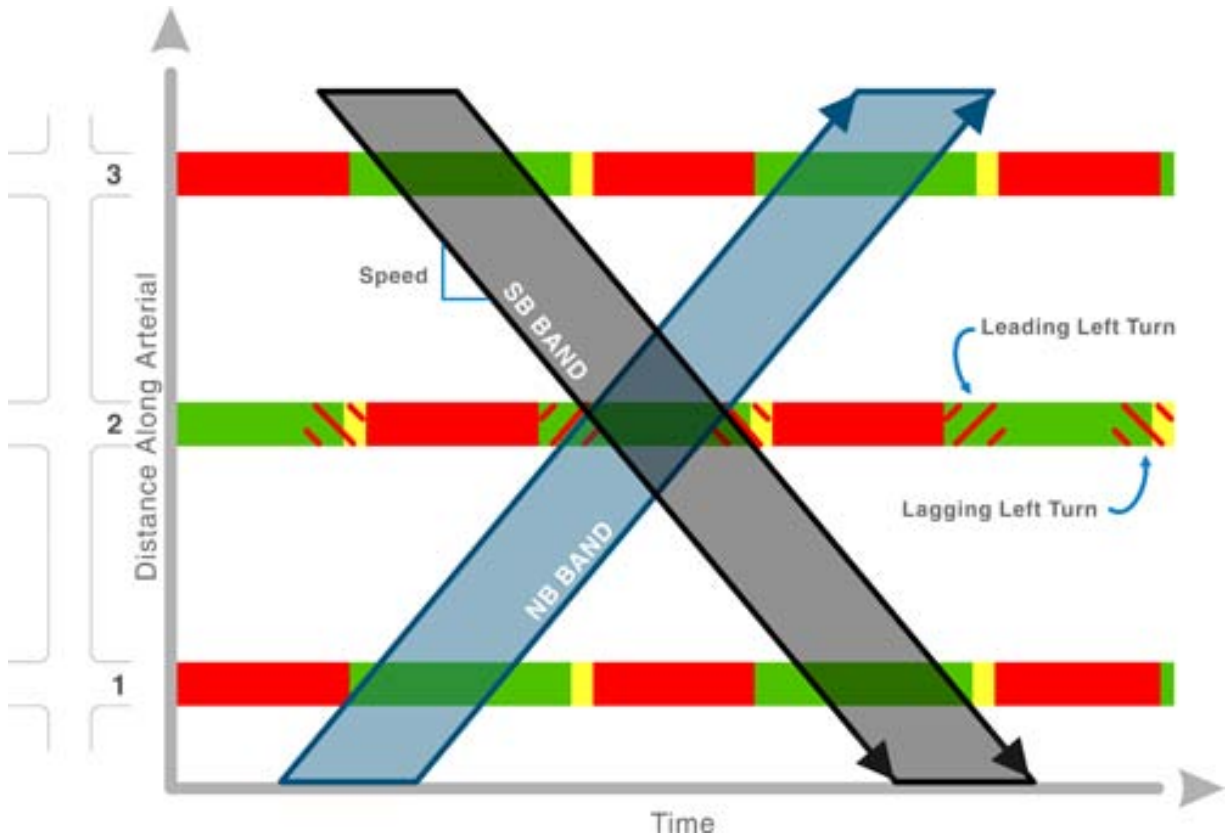


Figura 2.2 Ejemplo de Diagramas Espacio-Tiempo Coordinados
Fuente: Traffic Signal Timing Manual, Federal Highway Administration, 2008

Para lograr una coordinación semafórica apoyado por diagramas espacio-tiempo se utiliza generalmente el Sistema Progresivo Simple o Limitado, ya que éste permite ajustar por tanteos los desfases de los ciclos semafóricos para promover la coordinación. Es importante considerar que el tráfico es siempre dinámico y sus condiciones pueden variar de día a día, y no siempre se tendrán las condiciones idóneas para coordinar en papel los semáforos; por lo que siempre será mejor disponer de sistemas adaptativos que se basen en las condiciones de demanda en tiempo real y se coordinen los semáforos siempre al momento. De esa manera se podrá contar siempre con la mejor coordinación para los corredores, que se basa en el Sistema Progresivo Simple. Como punto negativo de este proceso será siempre el costo, ya que se necesitará invertir en tecnología, controladores y licencias que permitan tener este sistema disponible.

CAPÍTULO 3

TEORÍA DE MICROSIMULACIÓN

3.1. GENERALIDADES

Un programa de microsimulación para los sistemas de transporte es una herramienta que sirve para simular los fenómenos que ocurren en la vida real. Éste funciona con base en calibraciones y algoritmos matemáticos precisos. Con el avance tecnológico en la informática se fueron desarrollando estas herramientas para estudiar de una manera más clara y gráfica lo que ocurre en los sistemas de transporte. Los programas de microsimulación buscan tener la máxima precisión en cuanto al modelo de las operaciones del transporte, y con el paso del tiempo la calibración de ellos ha sido cada vez mejor y se ha mantenido en constante crecimiento, lo que ha llevado a que se tengan más de 100 empresas desarrollando software para la microsimulación.

El avance en esta área ha llegado ahora a niveles muy desarrollados, lo que permite modelar tráfico urbano privado, público y peatones con mucha precisión y confiabilidad. Debido al avance en la microsimulación, se considera que es la herramienta más utilizada en la actualidad para solucionar problemas en el área de transportes.

Los modelos de seguimiento vehicular han sido el ingrediente principal para elaborar los modelos de microsimulación. En el caso de un seguimiento vehicular constante se tienen imprecisiones en la evaluación del tránsito, ya que en este caso se está simulando el modelo con base a un valor promedio del comportamiento general del flujo vehicular. Estos modelos son útiles para: determinar velocidades deseadas de los autos con base a la congestión vehicular, determinar la capacidad de una vía y la longitud espacial de las colas.

Programas de microsimulación vehicular como VISSIM, PARAMICS, AIMSUN, CORSIN e INTEGRATION han logrado tener un buen desempeño en el análisis de los problemas viales que se presentan. Lo recomendable para hacer un análisis preciso de un modelo será comparar los resultados de varios programas confiables de microsimulación, de esta manera se aportará con información precisa, confiable y con utilidad para diseñar, resolver y plantear soluciones viales.

Un modelo de simulación del tránsito es desarrollado para modelar tráfico urbano y peatonal con base a un simulador de tránsito y un generador de señales de estado. El simulador de tránsito es el encargado de modelar el movimiento de los vehículos, mientras que el generador de señales de estado se encarga de modelar las decisiones de señal de estado desde el detector de información de tráfico del simulador de tránsito, regresando un estado de señal de regreso al simulador del tránsito.

La calidad de los modelos hechos con microsimulación se basa en la calidad del flujo de los automóviles, el cual tiene varias maneras de representarse. Los modelos más simples modelan el flujo de los automóviles tomando velocidades constantes y un modelo de seguimiento vehicular determinístico, mientras que los más completos adoptan diversos parámetros para calibrar la simulación y hacerla parecerse más a lo que ocurre en vida real.

Para desarrollar esta tesis se ha elegido VISSIM para modelar el corredor propuesto. VISSIM es un programa de microsimulación desarrollado en la Universidad de Karlsruhe, Alemania en los años 70's. La compañía alemana PTV Transworld AG fue la encargada de comercializar y distribuir VISSIM desde 1993, donde continúa actualizando el software. VISSIM es usado ampliamente en el mercado, frecuentemente en el modelado de carreteras y arterias urbanas, utilizando herramientas para su control en cada caso.

VISSIM se basa en fracciones de tiempo y en una simulación basada en el comportamiento de los vehículos. Ésta herramienta es útil para modelar tráfico urbano y rural, transporte público ferroviario o carretero y flujo de peatones. El flujo del tránsito, se basa en limitaciones de la distribución de carriles, composición vehicular, controladores y el registro de vehículos públicos y privados.

En los siguientes subtemas se describirán los cuatro modelos con los que opera VISSIM, que son: modelo de seguimiento vehicular, modelo de cambio de carril, modelo de comportamiento lateral y modelo de reacción a la luz ámbar.

3.2. MODELO DE SEGUIMIENTO VEHICULAR

El modelo de seguimiento vehicular puede analizarse determinísticamente, sin embargo los programas más modernos de microsimulación usan modelos estocásticos para diseñar el seguimiento vehicular.

El modelo de Wiedemann de 1974 es el modelo más usado por los programas de microsimulación. En pocas palabras este modelo consiste en que cuando se tiene un conductor que alcanza por detrás a un vehículo que va a menor velocidad, éste empieza a desacelerar puesto que ha alcanzado su propio límite de percepción de acercamiento al otro vehículo. Sin embargo el automóvil desacelera de tal forma que su velocidad llega a ser menor que la del vehículo de enfrente, consecuentemente el automóvil de enfrente se empieza a alejar, provocando que el de atrás acelere y busque alcanzar un nuevo límite de percepción y conservar cierta distancia de seguridad. De esta manera se mantienen ligeras aceleraciones y desaceleraciones dentro de un rango estable. Se presenta a continuación en el gráfico 3.1 el modelo de seguimiento vehicular de Wiedemann 74. Cabe mencionar que para esto pueden tenerse ciertos parámetros en el comportamiento del conductor para que se vean afectados estos valores de aceleraciones.

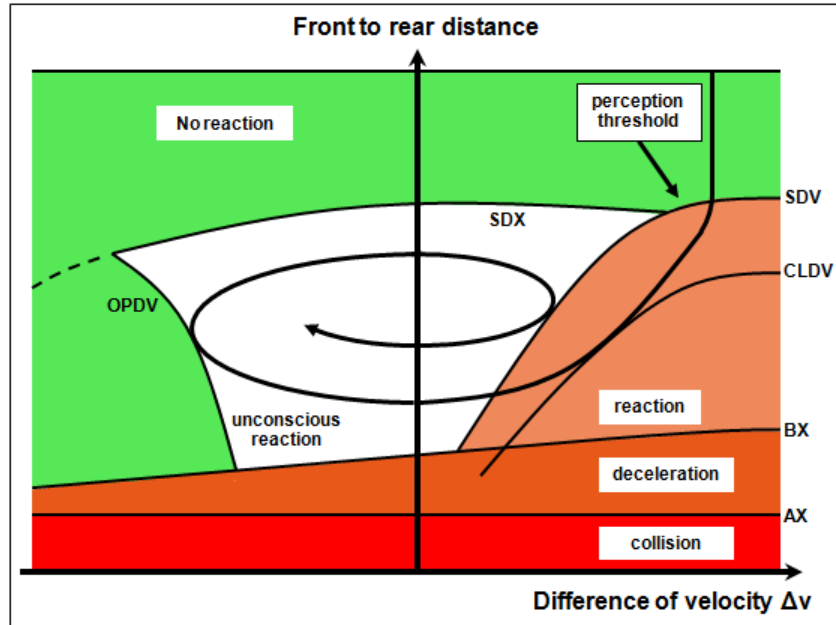


Figura 3.1 Modelo de Seguimiento Vehicular

Fuente: PTV VISSIM 7 User Manual, PTV Group, 2014

VISSIM no sólo se toma en cuenta el comportamiento con el vehículo de enfrente, sino también a los vehículos en los carriles adyacentes y a tener atención especial con los semáforos desde estando a 100 metros de distancia.

La simulación del flujo de vehículos tiene como componentes básicos a los autos. Estos mismos son singulares al presentar variaciones en su comportamiento al conducir y en sus características técnicas, que son: longitud, aceleración máxima, fuerza de aceleración, posición en la red y velocidad y aceleraciones al instante en la red. Durante la simulación se va teniendo un registro de todos los vehículos en la red, y se puede pausar la misma e ir viendo los detalles de cada vehículo, notando que son singulares y proveen una buena distribución de los vehículos para simular mejor el tráfico.

Modelo de Wiedemann

El modelo que usa VISSIM para el flujo vehicular es un modelo estocástico, de pasos de tiempo y microscópico, donde se tiene como una entidad básica el vehículo-conductor. Este modelo contiene un modelo de seguimiento vehicular pisco-físico para los movimientos longitudinales y un algoritmo basado en reglas para el comportamiento vehicular. Los modelos de Wiedemann que detallan el modelo se encuentran en las siguientes fuentes:

-Wiedemann, R. (1974). Simulation des Straßenverkehrsflusses. Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe (seit 2009 KIT – Karlsruher Institut für Technologie), Heft 8.

-Wiedemann, R. (1991). Modeling of RTI-Elements on multi-lane roads. In: Advanced Telematics in Road Transport edited by the Commission of the European Community, DG XIII, Brussels

El modelo de Wiedemann se basa en que se tienen 4 estados de manejo para un conductor, estos estados de manejo conforman al modelo de Wiedemann para seguimiento vehicular, dichos estados son:

- Libre.- No presenta afectaciones por algún otro vehículo. En este caso el conductor busca alcanzar una velocidad deseada, sin embargo no es exacto mantener esa velocidad debido a la precisión de los velocímetros y al hecho de que no se está viendo el mismo todo el tiempo. De esta forma el estado libre presenta oscilaciones en un rango bajo y alrededor de la velocidad deseada. Este estado contempla manejo libre sin ningún tipo de control de cruce, donde automáticamente se puede tener una velocidad constante por el auto que se esté manejando.
- Acercamiento.- Es el proceso en el que el conductor adapta su velocidad de acuerdo al vehículo de enfrente. El conductor conforme se acerca al otro auto desacelera para que no se presenten diferencias de velocidad una vez se llegue a una distancia de seguridad.
- Seguimiento.- El vehículo sigue al auto de enfrente despreciando la aceleración y desaceleración que se le esté obligando. El conductor inconscientemente acelera y desacelera con el único fin de mantener la distancia de seguridad, por lo tanto el cambio de velocidad que adquiere el vehículo oscila alrededor de cero.
- Frenado.- El conductor frena, desacelerando de mediana a gran manera cuando ve que al estar detrás de otro vehículo la distancia de seguridad es menor a la deseada. Esto ocurre por lo general cuando el vehículo de enfrente cambia abruptamente su velocidad o cuando un tercer vehículo se cambia de carril en medio de los dos autos.

Para cada uno de los cuatro estados mencionados, la desaceleración se define en función de la velocidad, diferencias de velocidad, la distancia entre vehículos y las características de los vehículos. Los conductores cambian de estado al llegar a un umbral definido por la diferencia de velocidad y la distancia, entonces si se tienen diferencias pequeñas de velocidad éstas sólo se perciben a distancias pequeñas, y al tener diferencias grandes de velocidad éstas se proyectan a mayores distancias. La

percepción de diferencias de velocidad, velocidades deseadas y distancias de seguridad varían mucho de acuerdo al comportamiento de las personas, que a su vez es variado dentro de una población y dependiendo de la zona geográfica y cultura que se presente. De esta forma puede verse como este modelo involucra aspectos psicológicos además de los ya mencionados aspectos físicos, esta es la razón por la cual se dice que es un modelo psico-físico.

Con base en los modelos podría uno darse cuenta que los cuatro modelos aplican íntegramente en una carretera o una vialidad sin obstáculos. En el caso de una ciudad, donde los obstáculos son muchos y se tienen muchos vehículos, se podría prácticamente descartar el seguimiento y sustituir en casi todos los casos el seguimiento por frenado.

Modelo de seguimiento vehicular en VISSIM

El software de microsimulación VISSIM utiliza el modelo psico-físico de seguimiento vehicular desarrollado por Wiedemann como parte del modelo con el cual lleva la simulación de tránsito. Se utiliza el modelo Wiedemann 1974 que define umbrales de percepción de los conductores que conllevan al comportamiento de los vehículos. El programa también contiene otro modelo, llamado Wiedemann 1999, que es muy similar al 74 pero presenta ligeros cambios en los umbrales de percepción haciéndolo más simple, de manera que este modelo funciona mejor en el comportamiento de arterias no semaforizadas o carreteras. El modelo 99 además permite ajustar los valores de los umbrales para los usos que requiera el usuario.

3.3. MODELO DE CAMBIO DE CARRIL

El modelo de cambio de carril que se usa en VISSIM fue desarrollado por Willmann y Sparmann en el año 1978. El modelo de Sparmann de modelo de cambio de carril se clasifica en dos tipos: cambio de carril a uno más rápido y cambio de carril a uno más lento. La decisión para hacer el cambio de carril corresponde a tres planteamientos: si se desea hacer el cambio de carril, si es favorable hacer el cambio y si es factible hacer el movimiento de cambio. (Kan y Bhan 2007).

VISSIM, al igual que INTEGRATION presenta dos tipos de cambio de carril, el cambio de carril necesario y el cambio de carril libre. El cambio necesario va asociado a la ruta que tenga un vehículo, donde se tiene que dar algún giro para continuar con la ruta y es necesario cambiarse de carril para que pueda dar vuelta y alcanzar algún conector. El cambio de carril libre ocurre cuando un vehículo busca tener más espacio para transitar o cuando desea ir más rápido. En el caso de VISSIM, antes de que se realice un cambio de carril se busca encontrar un esparcimiento deseado para posteriormente tomar decisiones. Esto significa que los vehículos antes de hacer un cambio de carril buscan encontrar el esparcimiento necesario para poder hacer el cambio, mismo valor puede cambiarse para realizar los cambios de carril en esparcimientos menores.

Para realizar un cambio de carril las variables del comportamiento del conductor que se toman en cuenta son la máxima desaceleración aceptable del vehículo y la del vehículo que se encuentra distancia atrás en el carril del cambio. Dicha desaceleración depende de la distancia a la parada de emergencia del conector siguiente de la ruta. Esto significa que si se tiene un vehículo que va a realizar un cambio de carril para un movimiento, la desaceleración del vehículo es aquella que le permita alcanzar el conector de la ruta con base a la distancia que se tiene. Si se tiene poca distancia para dar vuelta entonces podría darse el caso que el vehículo no alcance a tener la distancia mínima que le permita desacelerar para cambiarse de carril y luego seguir su ruta.

Para hacer un cambio de carril libre será necesario tener más espacio y mayor velocidad. En este caso VISSIM verifica la distancia de seguridad con respecto al vehículo de atrás del carril al que va a cambiarse. Esta distancia de seguridad depende de la velocidad del vehículo que va a hacer el cambio y de la velocidad del vehículo que está detrás en el nuevo carril. En los ajustes del programa no se

permite hacer cambios más agresivos para cambios de carril libres, sin embargo de manera indirecta se puede reducir la distancia de seguridad entre vehículos con un factor. Este factor pertenece a las propiedades de seguimiento vehicular, y ahí es donde puede hacerse el cambio.

Para ambos tipos de cambio de carril, primeramente se necesita encontrar la brecha adecuada en la dirección del flujo. Esta brecha depende de dos velocidades: la velocidad del vehículo que hace el cambio y la velocidad del vehículo que se aproxima por detrás en el carril al que se está haciendo el cambio. Para los cambios necesarios de carril, el tiempo en hallar esa brecha depende de la agresividad del conductor, de esta manera se llega a un parámetro de demora máxima que se utiliza para calcular los tiempos en hallar brechas.

3.4. MODELO DE COMPORTAMIENTO LATERAL

En una instancia, los automóviles en VISSIM utilizan todo el ancho del carril en el que están circulando; relativo a esto, en el programa se puede modificar el comportamiento lateral, sobre si el vehículo maneja al centro, derecha o izquierda del carril o sin especificar su posición lateral. De esta manera, si es carril es lo suficientemente amplio se puede rebasar utilizando parte del espacio libre de ese carril. En este caso, el vehículo que rebasa toma en cuenta su valor máximo de desaceleración; si este no permite que se frene a tiempo entonces se rebasa al auto de enfrente mientras siga siendo posible. En los parámetros laterales se pueden modificar algunas variables que toman en cuenta los giros que harán próximamente los autos y la distancia mínima lateral para conservarse. Si estos valores están fuera de sí entonces se tendrán colisiones.

Dentro de las opciones de ajuste de los parámetros de comportamiento lateral, si se selecciona la opción de mantener la distancia lateral con los vehículos en los otros carriles, entonces los autos consideran su posición para mantener una orientación lateral con los vehículos en los carriles adyacentes y de esta manera mantienen su distancia lateral mínima. Para este objetivo los autos ajustan su posición dentro de su carril y se desvían del camino. En la simulación se toma en cuenta también las posiciones traseras de los vehículos, que desean cambiar de carril o ya lo hicieron, si no se selecciona esta opción a considerar, entonces los vehículos en los carriles adyacentes se ignoran, incluso si son más anchos que sus carriles, excepto cuando realizan un cambio de carril.

Dentro del programa es posible modificar otras opciones relacionadas al comportamiento lateral, como distribución de los vehículos en colas, comportamiento lateral previo a giros próximos, velocidad mínima longitudinal, cambios de dirección laterales, rebasar en el mismo carril, distancia lateral mínima, entre otros. Donde dichos parámetros resultan útiles para modelar vialidades donde se presentan distintos tipos de vehículos, principalmente donde se tienen bicicletas y motocicletas. Sin embargo manipular estos parámetros para vialidades donde se tienen puros automóviles resultará poco útil modificar estas opciones.

3.5. MODELO DE REACCIÓN A LA LUZ ÁMBAR

La luz ámbar se creó desde un principio con la función de prevenir el cambio de señal de verde a rojo. Esta luz ámbar tiene diferentes interpretaciones en los conductores; por ejemplo si un auto ve una luz ámbar a una distancia considerable, lo lógico es que se quiera bajar la velocidad para detenerse en la línea de alto; sin embargo si un auto ve una luz ámbar a una distancia muy corta en el cruce, entonces el auto tendería a seguir su camino. Típicamente las luces ámbar duran entre 3 y 4 segundos, dependiendo del tamaño del cruce. En este tiempo las reacciones de los conductores pueden variar, y esta variable puede tener importancia en la evaluación de un corredor. Es por eso que los modelos de microsimulación presentan por lo general una manera de tomar esto en cuenta.

En el caso de VISSIM, se tiene el caso que un vehículo reduce su velocidad al ver adelante una señal en rojo. En el caso de una luz ámbar, se puede ajustar de dos maneras el comportamiento ante ella: un modelo de chequeo continuo y otro modelo basado en una decisión única. El modelo default asignado es el de chequeo continuo.

En el chequeo continuo, durante la simulación, la posición de los vehículos, su velocidad y su aceleración se computan cada fracción de segundo (se tiene hasta 10 fracciones de segundo de simulación, siendo un valor ajustable, se le conoce también como resolución de simulación). En el modelo de chequeo continuo, la interacción de los vehículos y sus decisiones se actualizan cada fracción de tiempo, para así modelar un vehículo que se aproxima a una luz ámbar. Los vehículos en este modelo cruzan la intersección si no pueden alcanzar a frenar por completo antes de la línea de alto; de manera que si un auto puede detenerse seguramente antes de la línea de alto, lo hará. Los vehículos primeramente consideran que la luz ámbar estará visible por 2 segundos más, después deciden continuamente, cada fracción de segundo si se van a detener o no. Los autos no frenarán si su máxima desaceleración no le permite detenerse antes de la línea de alto o si tendrá que frenar a razón de 4.6 m/s o más. El vehículo frenará si con su velocidad actual no puede llegar al semáforo en 2 segundos. Los casos para frenar y detenerse son posibles si un auto se encuentra en estos dos escenarios, donde VISSIM determina si un vehículo va a frenar utilizando una distribución normal aleatoria.

En el modelo de decisión única, la decisión de cruzar o no una intersección en una luz ámbar se basa en probabilidades. Lo que determina si se va a cruzar o no es lo que la probabilidad diga, sin importar si el vehículo alcance a detenerse, o si el vehículo puede cruzar la intersección de manera segura. Dicha probabilidad dicta si un auto se detiene o no en una luz ámbar, para ello se utiliza una función de regresión con parámetros Alpha, Beta1, Beta2, velocidad del vehículo v y distancia a la línea de alto dx :

$$p = \frac{1}{1 + e^{-\alpha - \beta_1 v - \beta_2 dx}}$$

Fórmula 3.1 Probabilidad de si un Vehículo se Detiene o no en Luz Ámbar

Fuente: PTV VISSIM 7 User Manual, PTV Group, 2014

Los valores default de dichos parámetros son basados en datos empíricos, sin embargo pueden modificarse en las opciones de comportamiento del conductor. La decisión en este caso se hace cuando el vehículo cruza la línea de alto. Para producir resultados más precisos en las opciones del usuario se puede incrementar el número de vehículos observador. Internamente los semáforos se modelan como vehículos y sólo pueden reconocerse si el número de vehículos y objetos en la red entre el vehículo en cuestión y el semáforo, no excede el número de vehículos observador menos 1.

Cuando un vehículo decide detenerse en una luz ámbar, entonces éste comienza a frenar, alcanzando así una constante desaceleración que le permitirá detenerse justo sobre la línea de alto. Esta desaceleración aplicada depende de la distancia a la línea de alto dx y de la velocidad del vehículo v , y se calcula de la siguiente manera:

$$b_{requerida} = \frac{v^2}{2dx}$$

$$b_{aplicada} = \text{MIN}(b_{requerida}, b_{max})$$

Fórmula 3.2 y 3.3 Desaceleración Requerida para Detenerse en la Línea de Alto

Fuente: PTV VISSIM 7 User Manual, PTV Group, 2014

Donde $b_{requerida}$ es aquella que se necesita para desacelerar y a es aquella desaceleración máxima de acuerdo a la función de desaceleración definida.

Por último es importante mencionar el factor de reducción que se utiliza para el cálculo de distancias reducidas de seguridad. Este factor se multiplica por la distancia de seguridad original del vehículo, que se encuentra definida por los valores de inicio y final de antes y después del semáforo. En el caso de cambios de carril enfrente de la línea de alto, se calculan ambos valores y VISSIM utiliza para modelar el valor más pequeño de las dos distancias.

En el caso de INTEGRATION, un vehículo se detiene en una luz roja de la misma manera que lo haría si se encuentra enfrente un vehículo estacionado, mientras que al presentarse una luz ámbar se tiene el pleno conocimiento del tiempo restante de la luz ámbar y decide cruzar si el tiempo para cruzar (con la velocidad que lleva) es menor que el tiempo restante del ámbar. Si este tiempo no es suficiente el vehículo se detendrá en la línea de alto. En este caso la decisión se hace cada décima de segundo en lo que el vehículo se aproxima al semáforo. Se planea posteriormente hacer ajustes más precisos para que los conductores tengan errores al calcular el tiempo en cruzar la intersección y se presenten condiciones más reales.

3.6. PROCESO PARA OPTIMIZAR LA PROGRAMACIÓN SEMAFÓRICA

El manual de usuarios de VISSIM 7 explica en el capítulo 6.14.4. el proceso que lleva a cabo el programa para optimizar los tiempos semafóricos. Este procedimiento se basa en hacer repetidas veces simulaciones en la red, donde se desactivan todos los controladores excepto los semáforos con el objetivo de ir cambiando los tiempos de verde y buscar tener un mayor flujo vehicular y menor demoras. De manera que al final del proceso se cambian los tiempos de acuerdo al mayor flujo y la menor demora.

Los pasos que lleva a cabo VISSIM de acuerdo al manual para hacer la optimización son los siguiente:

1. Se determina la demora promedio de todos los vehículos que han pasado por los nodos dentro de los carriles que contienen semáforos, utilizando una evaluación de nodo que se creó automáticamente para cada grupo de señales a lo largo de la simulación.
2. El grupo semafórico que presenta mayor demora se determina en cada escenario.
3. El escenario con el mínimo de los máximos promedios de demora se selecciona como el mejor escenario.
4. El escenario con el máximo de los máximos promedios de demora se selecciona como el peor escenario.
5. Se sustrae un segundo del tiempo de verde del mejor escenario.
6. Se añade un segundo del tiempo de verde al peor escenario.
7. Si no se puede sustraer un segundo del mejor escenario se utilizará el segundo mejor escenario. Si éste tampoco puede ser acortado, el siguiente peor escenario se tomará iterativamente. Si ya no se pueden acortar los tiempos en ningún caso entonces la optimización habrá finalizado.
8. Una programación semafórica es mejor que otra si cumple con lo siguiente:
 - El flujo total de vehículos dentro del nodo incrementa por 25 vehículos o por un 10% si son menos.

- Si el flujo no ha disminuido por 25 vehículos o por un 10%, y la demora promedio en todos los vehículos ha disminuido.
 - Si la programación es mejor que la mejor calificada, ésta sería ahora la nueva mejor. La optimización entonces continuaría con el siguiente paso:
9. La optimización habrá terminado si se cumple alguno de los siguientes criterios:
- La programación semafórica no mejora después de 10 simulaciones.
 - Cuando el flujo disminuye más de un 25% comparado con el de la mejor programación.
 - La demora promedio incrementa por más de un 25%.

CAPÍTULO 4

CORREDOR EN ESTUDIO

4.1. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y GEOMÉTRICAS

La avenida Miguel Ángel de Quevedo se encuentra al sur del Distrito Federal en la delegación Coyoacán, por la organización vial de la ciudad se le puede llamar también Eje 9 Sur aunque es poco común llamarla de esa manera. En esta tesis se abreviará el nombre de la avenida como MADQ.

El corredor recorre una distancia de 4.63 kilómetros de Este a Oeste en ambos sentidos. Al Oeste la avenida entronca con Avenida Insurgentes Sur, mientras que al Este el corredor cruza la Calzada de Tlalpan y cambia de nombre a Taxqueña.

MADQ cruza por avenidas importantes y de alto tráfico vehicular, como lo son: Insurgentes, Universidad, División del Norte, Pacífico y Tlalpan. A su vez la avenida cruza por puntos importantes de alta demanda vehicular, como lo son la calle Felipe Carrillo Puerto, que lleva al centro de Coyoacán, unas cuantas escuelas, librerías, supermercados y las estaciones de metro Miguel Ángel de Quevedo (línea 3) y Taxqueña (línea 2).

El tramo que se definió para el análisis de esta tesis está comprendido entre la avenida Insurgentes y la calle Ignacio Zaragoza, recorriendo una distancia de 1.5 kilómetros. Los cruces que contiene este segmento se describen en la tabla 4.1, mostrando el lado del cruce geográfico, y si cuenta con retorno (sobre MADQ) y semáforo.

Tabla 4.1. Intersecciones del Corredor

Fuente: Elaboración Propia, 2015

Vialidad	Lado de Cruce	Retorno	Semáforo
Av. Insurgentes	Norte y Sur	Sí	Sí
San Luis Potosí	Sur	No	No
Lombardo Toledano	Norte	No	No
Av. de la Paz	Sur	Sí	Sí
Arenal	Norte	No	Sí
Chimalistac	Sur	Sí	Sí
Ignacio Allende	Norte	Sí	No
Callejón San Ángel	Sur	Sí	No
Av. Paseo del Río	Sur	Sí	No
Av. Universidad	Norte y Sur	Sí	Sí
Panzacola	Norte	Sí	No
Salvador Novo	Norte	Sí	No
Cerro del Hombre	Sur	Sí	Sí

Cerrada Pedregal	Norte	No	No
Cerrada Miguel Ángel de Quevedo	Norte	No	No
Kappa	Sur	No	No
Ignacio Zaragoza	Norte y Sur	Sí	Sí

Con base en estas características puede determinarse teóricamente con la cantidad de semáforos y longitud de la vía, la densidad de semáforos de la avenida en el tramo en estudio. Con ese dato se obtiene el tipo de calle que es el corredor (tabla 2.1), y posteriormente la velocidad de flujo libre default de la misma (tabla 2.2).

La densidad de semáforos es igual a 7 por 1.5 km, que equivale a 4.67 semáforos / km. Utilizando la tabla 2.2 e interpolando valores, se llega a una velocidad de flujo libre teórica igual a 51 km/hr. Este dato será utilizado más adelante para el cálculo del nivel de servicio.

4.1.1. Carriles

MADQ tiene tres carriles por sentido entre Insurgentes y Universidad, mientras que de Universidad a Ignacio Zaragoza tiene cuatro. El ancho de cada carril en todo momento es de tres metros, mismo que se encuentra por debajo de los 3.5 metros que es el recomendado. Este factor es importante, ya que sobre la avenida los vehículos prefieren circular por los carriles centrales en lugar de los extremos, del mismo modo la velocidad sobre los carriles extremos es menor a la de los internos, por lo que los carriles extremos son usados básicamente para movimientos que necesiten usar el carril o para el transporte público.

Los carriles de las vialidades que cruzan MADQ varían en número y ancho. Se tienen cruces con avenidas de mayor demanda como lo son Universidad e Insurgentes y un gran número de calles secundarias, en su mayoría de uso residencial. Es entonces que se tiene una gran variedad en los carriles de estas vialidades, evidentemente se presenta un mayor número de carriles en las avenidas más transitadas, con registros de velocidades grandes; mientras que las calles secundarias presentan menos carriles, con velocidades muy variables ya que en algunos casos se tienen calles empedradas. Toda la información recolectada de los carriles fue útil para posteriormente modelar las vialidades con todas la información real. Las mediciones de los carriles se realizó virtualmente utilizando Google Earth y el uso de las calles y cada carril se observó y registró en campo.

4.2. AFOROS

Con el fin de obtener la información vial primeramente se hicieron aforos en cada cruce de la avenida. Las consideraciones que se llevaron a cabo para obtener los volúmenes viales son las siguientes:

- Se tomaron diez registros de únicamente los días miércoles de 7:30 a 9:30 am, empezando el 24 de septiembre y terminando el 26 de noviembre del 2014.
 - El volumen de las calles: Cerrada Miguel Ángel de Quevedo, Cerrada Pedregal, Kappa, Salvador Novo e Ignacio Allende se tomó sólo durante 15 minutos, ya que el volumen presente en dichas calles es muy bajo.
- Los aforos se realizaron por dos personas, de las cuales se asignó la mitad de los movimientos a una y la otra mitad a otra, de tal manera que se pudieran llevar todos conteos simultáneamente.

- Por practicidad y precisión se utilizó por cada persona una aplicación para teléfono celular que maneja contadores simultáneos. Esta aplicación tiene como nombre “Contador de mano”, cuyo desarrollador es Ángel García Rubio.
- Cada 15 minutos se tomaba el registro de cada movimiento en cuestión.
- El conteo se realizó en cada cruce tomando en cuenta todos los movimientos presentes salvo una excepción.
 - La excepción radica en los movimientos de frente en MADQ en ambos sentidos. Dado que los aforos se hicieron en días diferentes y para evitar ajustes de un mismo movimiento, se optó por tomar el valor de los aforos en los puntos de inicio. Esto significa que se registraron los vehículos entrantes a Miguel Ángel de Quevedo por Insurgentes (Acceso Oeste) y los movimientos de frente en Ignacio Zaragoza (Acceso Este). Los movimientos de frente en MADQ en los demás cruces no se tomaron en cuenta. Estos valores se calcularon restando el número de vehículos totales en un cruce menos el número de los demás movimientos juntos.
- Cuando fuere el caso, se clasificaron los movimientos de los vehículos en particulares (incluido transporte de carga) y públicos (autobuses de pasajeros).
- Las motocicletas, bicicletas y peatones presentan un volumen muy bajo por lo cual se optó por excluir su conteo.

Los resultados de los aforos se encuentran en el Anexo A (Aforos Vehiculares).

4.3. HORA PICO

Con base en los aforos se calculó la hora pico del sistema. Para lograrlo se identificó que el cruce que más congestión causaba era el de la glorieta con Av. Universidad. El tráfico presente en este cruce afecta a todo el sistema y puede considerarse que la hora pico en el corredor es la misma que la hora pico en la glorieta.

Con los resultados de los aforos para el cruce con Av. Universidad, se calcularon los volúmenes totales para las horas: 7:30-8:30, 7:45-8:45, 8:00-9:00, 8:15-9:15 y 8:30-9:30. De los cuales se puede ver que la hora pico es de 8:00 a 9:00. Estos resultados se ven a continuación:

Tabla 4.2. Obtención de la Hora Pico

Fuente: Elaboración Propia, 2015

Intervalo	Acceso				Total
	MADQ E	MADQ W	Universidad N	Universidad S	
7:30 - 8:30	1,723	736	2,511	1,889	6,859
7:45 - 8:45	1,702	818	2,758	1,944	7,222
8:00 - 9:00	1,683	878	2,847	2,002	7,410
8:15 - 9:15	1,591	978	2,808	2,007	7,384
8:30 - 9:30	1,581	1,034	2,717	2,047	7,379

Como se mencionó anteriormente, la hora pico para todo el sistema será la misma que la del cruce de la glorieta, por lo que en cada cruce se tomó la información vial referente al intervalo de 8 a 9 a.m. Para presentar dichos resultados se optó por trazar un esquema de cada intersección mostrando su aforo en la hora pico. Estos diagramas se encuentran en el Anexo B (Esquemas Intersecciones en Hora Pico).

4.4. TIEMPOS DE RECORRIDO

Los tiempos de recorrido se tomaron tres días, todos en miércoles empezando el 3 de diciembre y terminando el 17 de diciembre del 2014. La toma de tiempos se realizó por el autor de esta tesis en un vehículo particular, siendo asistido por un cronómetro y un reloj para el registro de los tiempos y la hora. Para procurar tener resultados cercanos a la media, se buscó tener un modo de manejar similar al de la mayoría de los conductores.

Se tomó el tiempo de dos rutas, que son los referentes a los de la avenida MADQ en ambos sentidos en el tramo definido. Para tomar el registro de tiempos se empezó por tomar primero el tiempo de la ruta Este – Oeste. Se empezó el recorrido en punto de las 8:00 y el punto exacto donde empezó a tomarse el tiempo fue a la altura de la calle Tata Vasco. El cronómetro se detuvo al cruzar la línea de alto con la Avenida de los Insurgentes y se registró el tiempo. Posteriormente se regresó a MADQ para tomar el tiempo de recorrido de la ruta Oeste – Este. Aproximadamente a las 8:10 se empezó a recorrer la ruta, siendo a la altura de la calle San Luis Potosí donde se inició el cronómetro y se detuvo al cruzar la línea de alto con Ignacio Zaragoza.

Los resultados de los tiempos de recorrido se muestran en la tabla 4.3.

Tabla 4.3. Tiempos de Recorrido

Fuente: Elaboración Propia, 2015

Ruta	Día			Promedio
	3/12/2014	10/12/2014	17/12/2014	
E - W	9' 12"	7' 48"	8' 31"	8' 30"
W - E	5' 18"	5' 3"	5' 37"	5' 19"

Con base en estos tiempos se puede calcular la velocidad media para cada uno de estos tiempos de recorrido. Para el tramo E - W se tienen 10.59 km/hr y para el tramo W - E se tienen 16.93 km/hr. Con estos resultados, y utilizando la tabla 2.3 se tiene un nivel de servicio de F para el tramo W - E y un nivel de servicio de E.

4.5. PROGRAMACIÓN DE LOS SEMÁFOROS

Los semáforos presentes a lo largo de la avenida son todos de tiempo fijo. Sobre la avenida MADQ, en el tramo en estudio, se tienen seis cruces controlados por semáforo, estos cruces son con las vialidades: Insurgentes, Arenal/Av. de la Paz, Arenal/Chimalistac, Universidad, Cerro del Hombre e Ignacio Zaragoza.

La programación de los tiempos semafóricos se registró entre el periodo de 7:30 a 9:30, donde los tiempos no cambiaron y fueron constantes durante todo el periodo. Con la ayuda de un reloj con segundero y un cronómetro se tomó el registro de la hora a la que empezaba cada ciclo semafórico mientras se tomaba el tiempo de verde, ámbar y rojo para cada fase. Los resultados de los tiempos de intervalo (TI) para cada cruce son los siguientes:

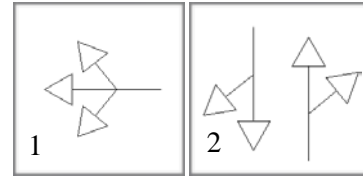
Tabla 4.4. TI Insurgentes [Segundos]

Fuente: Elaboración Propia, 2015

Fase	Verde	Ámbar	Rojo	Ciclo
1	42	3	75	120
2	70	3	47	120

Figura 4.1. Fases Insurgentes

Fuente: Elaboración Propia, 2015

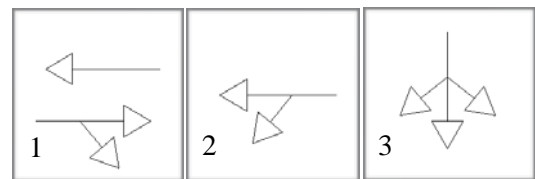
**Tabla 4.5. TI Arenal / Av de la Paz [Segundos]**

Fuente: Elaboración Propia, 2015

Fase	Verde	Ámbar	Rojo	Ciclo
1	43	3	74	120
2	30	3	87	120
3	21	3	96	120

Figura 4.2. Fases Arenal / Av de la Paz

Fuente: Elaboración Propia, 2015

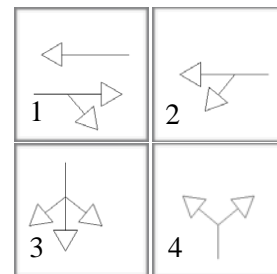
**Tabla 4.6. TI Arenal / Chimalistac [Segundos]**

Fuente: Elaboración Propia, 2015

Fase	Verde	Ámbar	Rojo	Ciclo
1	43	3	74	120
2	30	3	87	120
3	21	3	96	120
4	10	3	107	120

Figura 4.3. Fases Arenal / Chimalistac

Fuente: Elaboración Propia, 2015

**Tabla 4.7. TI Universidad [Segundos]**

Fuente: Elaboración Propia, 2015

Fase	Verde	Ámbar	Rojo	Ciclo
1	23	3	94	120
2	11	3	106	120
3	54	3	63	120
4	11	3	106	120

Figura 4.4. Fases Universidad

Fuente: Elaboración Propia, 2015

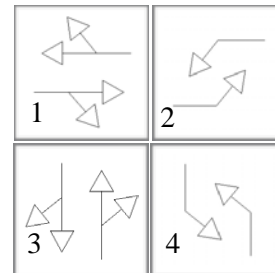


Tabla 4.8. TI Cerro del Hombre [Segundos]
Fuente: Elaboración Propia, 2015

Fase	Verde	Ámbar	Rojo	Ciclo
1	56	3	61	120
2	11	3	106	120
3	41	3	76	120

Figura 4.5. Fases Cerro del Hombre
Fuente: Elaboración Propia, 2015

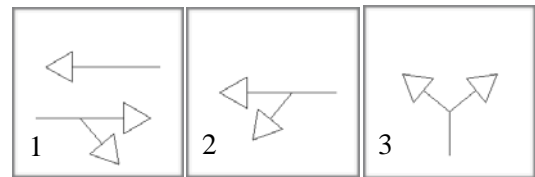
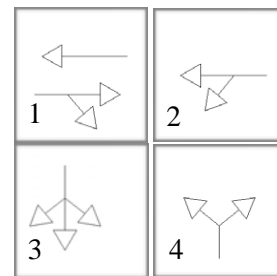


Tabla 4.9. TI Ignacio Zaragoza [Segundos]
Fuente: Elaboración Propia, 2015

Fase	Verde	Ámbar	Rojo	Ciclo
1	59	3	58	120
2	6	3	111	120
3	17	3	100	120
4	18	3	99	120

Figura 4.6. Fases Ignacio Zaragoza
Fuente: Elaboración Propia, 2015



4.5.1. Programación a lo Largo de la Avenida

Con base en los tiempos semafóricos de cada intersección y con su registro de inicio se puede ver cómo queda la programación a lo largo de MADQ. Para lograr esto se traza un gráfico de tiempo con respecto a posición y en cada punto donde hay semáforo se muestra los cambios del mismo y se puede inferir un poco sobre su coordinación. Durante las dos horas de estudio no se vio ningún cambio en los tiempos en los semáforos, por lo que se mantienen constantes todo el tiempo. En la siguiente figura se puede ver también el tiempo de desfase que cada grupo semafórico contiene, poniendo como base el tiempo en el que se tiene verde en MADQ acceso Este, que resultará ser la ruta de mayor conflicto y la que se buscará coordinar posteriormente. A continuación se muestra la programación para los primeros 8 minutos del análisis en la figura 4.7.

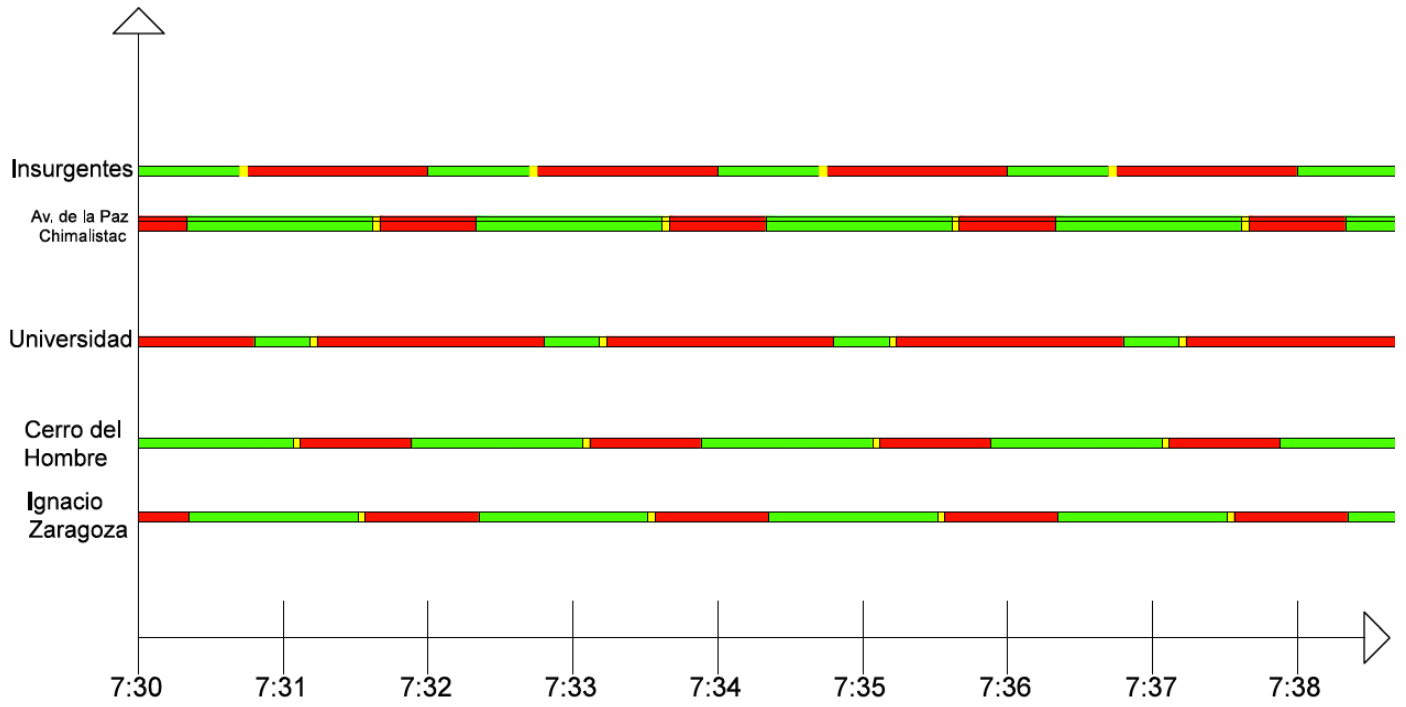


Figura 4.7. Programación Semafórica en la Avenida
Fuente: Elaboración Propia, 2015

CAPÍTULO 5

MODELO DE MICROSIMULACIÓN

5.1. TRAMOS Y CONECTORES

En el modelo que se realizó en VISSIM se trazaron tramos y conectores para modelar la geometría de la red en cuestión. Se entiende por tramo, aquel segmento de vialidad que tiene un número de carriles fijo y de ancho constante, al que se le pueden ingresar entradas vehiculares desde su inicio. Los conectores son segmentos de vialidad que unen dos tramos mediante un número constante de carriles. Se midió en Google Earth el ancho de los carriles en cada cruce, y ese valor se tomó para trazar los tramos. En el trazado de las vialidades se tomó en cuenta el número neto de carriles, sin importar su uso, ya que posteriormente se puede modificar el uso de cada carril, ya sea para que circulen un tipo de vehículos en específico o para que se definan estacionamientos.

Para que el trazo fuera preciso se utilizó como base el mapa que trae precargado VISSIM 7 (figura 5.1), que trae georreferenciados los mapas y las longitudes son muy precisas. Sobre las calles que vienen trazadas en el mapa se fueron dibujando las vialidades en su punto exacto para tener la precisión deseada.

En VISSIM al ir definiendo tramos también puede definirse que tipos de vehículos pueden circular por cada carril. Esto resultó útil para todas las avenidas por las que cruza MADQ, ya que en varias de ellas se tienen coches estacionados en un carril que obstruyen el paso de los coches. En MADQ se estacionan vehículos en algunos puntos, sin embargo los carriles no están obstruidos por toda la avenida, para este caso se definieron lugares de estacionamiento de una manera totalmente diferente (ver Cap. 5.6.3.).



Figura 5.1 Trazo del Corredor en VISSIM (con mapa)
Fuente: Elaboración Propia, 2015

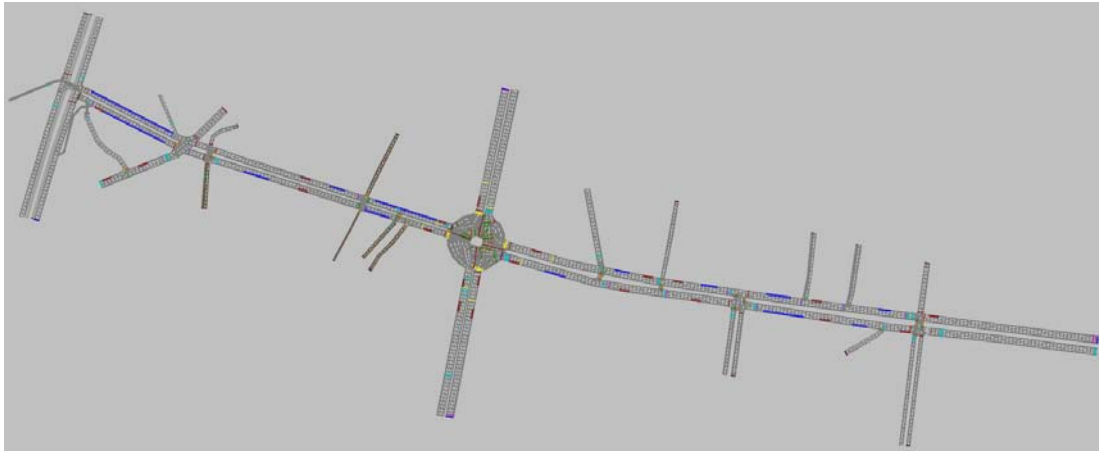


Figura 5.2 Trazo del Corredor en VISSIM (sin mapa)
Fuente: Elaboración Propia, 2015

5.2. DISTRIBUCIONES

Las distribuciones que se definen en el modelo son aquellas que se asignan para que funcione un modelo estocástico. En el caso de estudio se necesitan distribuciones de velocidad y de tiempo. Las de velocidad para todas las velocidades que adquieren los vehículos en la red y las que tiempo que se basan principalmente para el tiempo de las paradas en el transporte público o de los coches estacionados.

5.2.1. De Velocidad

Las distribuciones de velocidad se asignan para la velocidad a la que va cada tipo de vehículo, éstas se definieron con base a lo que ocurre en la práctica. En el modelo en cuestión se definieron dos distribuciones de velocidad para los tres tipos de vehículo que están presentes, que son automóviles, buses (transporte público) y camiones de carga. Se utilizó una misma distribución para los buses y camiones de carga, ya que van aproximadamente a la misma velocidad. Ambas distribuciones tienen un rango de valores que se definen por un valor mínimo y uno máximo, siendo distribuidos linealmente los valores intermedios. Las distribuciones que se ingresaron VISSIM tienen las siguientes características:

Tabla 5.1. Distribuciones de Velocidad

Fuente: Elaboración Propia, 2015

Número	Nombre	Velocidad Mínima (km/hr)	Velocidad Máxima (km/hr)
1023	Coches	30	50
1024	Camiones	20	25

5.2.2. De Tiempo

En este modelo, las distribuciones de tiempo se utilizan para el tiempo que tarda el transporte público en el ascenso/descenso de pasajeros y para el tiempo que tardan los autos en permanecer estacionados.

En este modelo se utilizaron cuatro distribuciones, que contempla a la distribución default más tres distribuciones que se definieron. La lista de las distribuciones se desglosa a continuación:

Tabla 5.2 Distribuciones de Tiempo

Fuente: Elaboración Propia, 2015

Número	Nombre	Límite Inferior (s)	Límite Superior (s)	Desviación Estándar (s)	Media (s)
1	Default	0	40	2	20
2	Tardada	0	300	10	200
3	Menos Tardada	0	80	3	50
4	Permanente	0	7200	0	7200

5.3. VEHÍCULOS EN LA RED

Esta sección explicará todo lo que se ingresó a VISSIM en cuanto a los vehículos para modelar el corredor y las calles con las que cruza. La base principal para modelar la avenida fueron los aforos, que proveen información sobre el número de automóviles que recorren las avenidas y registra las decisiones de ruta que se toman en cada cruce. El programa permite definir las entradas vehiculares y decisiones de ruta por lapsos de 15 minutos, de manera que lo que se ingresó en el modelo fue tal cual lo que se midió en los aforos en cada momento.

5.3.1. Composición del Tránsito

Por composición del tránsito se entiende el tipo de vehículos que se encuentran circulando por las vialidades. Esta composición se basa únicamente en el porcentaje de automóviles particulares y camiones de carga (Heavy Goods Vehicles - HGV). La composición del tránsito se basó al contar por 15 minutos el número de automóviles particulares y camiones de carga para posteriormente ver el porcentaje de cada uno. El transporte público no se toma en cuenta en esta sección debido a que se ingresa en otra categoría (ver Cap. 5.4.). De manera que los tres tipos de vehículos que se tienen circulando son automóviles, HGV y buses de transporte público.

Para el caso en estudio se utilizaron 5 composiciones vehiculares (no se utilizó la Default), que se pueden resumir en la siguiente tabla:

Tabla 5.3 Composiciones Vehiculares

Fuente: Elaboración Propia, 2015

Número	Nombre	Car	HGV	MB	Distribución de Velocidad (Autos)	Distribución de Velocidad (Camiones)
2	Insurgentes	97%	3%	0%	1023: Coches	1024: Camiones
3	MADQ y Universidad	96%	4%	0%	1023: Coches	1024: Camiones
4	Empedrada	100%	0%	0%	20: 20 km/hr	N/A

5	Secundaria	100%	0%	0%	30: 30 km/hr	N/A
6	MB	0%	0%	100%	N/A	50: 50 km/hr

5.3.2. Entradas Vehiculares

Con base en los resultados de los aforos se definieron entradas vehiculares en cada tramo que lo requiriera. Por lo tanto cabe decir que todos los tramos que entran a Miguel Ángel de Quevedo, o lo cruzan, poseen entradas vehiculares. Miguel Ángel de Quevedo tiene entradas vehiculares únicamente del Este, ya que por el Oeste la avenida es alimentada por Insurgentes y no requiere de entradas. Como en los aforos la información que se obtuvo fue de las decisiones de ruta, para determinar las entradas vehiculares se hicieron las sumas correspondientes para asignar la cantidad de vehículos necesarios.

Parte de este modelo contempla que se estacionan vehículos sobre MADQ. Para lograr tener vehículos estacionados se ingresaron las entradas necesarias para que no se viera afectado el número de vehículos en la red. Estas entradas vehiculares se asignaron sobre Miguel Ángel de Quevedo, en el acceso Este después de la glorieta y en el acceso Oeste también después de la glorieta, donde comienzan los tramos.

5.3.3. Decisiones de Ruta

Las decisiones de ruta representan íntegramente los resultados medidos en los aforos. Éstos se colocaron lo más atrás posible de cada cruce para que los vehículos tuvieran el tiempo para tomar la decisión de hacia donde se iban a dirigir. De manera que éstas decisiones de ruta se tuvieron a lo largo del corredor, por lo que en el modelo puede verse que se tiene una decisión de ruta que cuando llega a su punto de fin comienza con una nueva decisión de ruta, entonces los vehículos todo el tiempo están tomando decisiones de ruta. Estas decisiones de ruta no afectan al transporte público, al que separadamente se le definen sus rutas.

5.4. TRANSPORTE PÚBLICO

Para definir el transporte público se basó en los aforos, donde en cada cruce se contó el número de camiones que transitaban y las rutas que seguían. De manera similar se estimó y promedió el tiempo que tomaba cada camión en detenerse para el descenso y ascenso de pasajeros. Esto se buscó simular lo más parecido a la realidad aunque en realidad el transporte público que opera en la red es muy informal y no tiene reglas claras para sus tiempos de operación o paradas.

5.4.1. Rutas

En el modelo se definieron 10 rutas de transporte público que fueron las que se observaron en los aforos. En VISSIM las rutas requieren de dos componentes principales, que es la ruta geométrica y su tasa de servicio.

En cuanto a las rutas, con base en la observación se definieron 10 rutas, mismas que tienen sus respectivas tasas de servicio. De MADQ del Este salen dos rutas, una que recorre la avenida hasta dar vuelta a la izquierda en Av. de la Paz, y otra que da vuelta a la izquierda en la glorieta para tomar Av. Universidad al Sur (trolebús). De Insurgentes Sur salen 3 rutas, donde las tres comienzan girando a la derecha en MADQ, rumbo al este. La primera ruta recorre todo MADQ hasta el este, la segunda al

llegar a Av. Universidad gira a la derecha para dirigirse al sur, mientras que la tercera gira inmediatamente en Av. de la Paz para cruzar Insurgentes y seguir su ruta. Por otra parte Avenida Universidad tiene rutas iniciando por el norte y por el sur. Del norte se presentan 2 rutas, mientras que del sur 3. Empezando por el norte se tiene una ruta que continúa derecho por la avenida, mientras que la otra ruta gira a la derecha en la glorieta, dirigiéndose al Oeste, donde va a retornar a la altura de Arenal y continuar su recorrido por MADQ hacia el Este. De las rutas que comienzan del Sur, una gira a la derecha en la glorieta para recorrer MADQ al Este (trolebús), otra gira en la glorieta a la izquierda para recorrer MADQ al Oeste, y la otra ruta retorna hacia el Sur dándole toda la vuelta a la glorieta. (Aquí es importante mencionar que éstas dos últimas rutas generan torpeza en la operación de la glorieta, ya que los camiones obstruyen grandes secciones de la vialidad y en algunas ocasiones bloquean por completo el paso hacia algún destino, una de las causas principales del tráfico en la glorieta es debido a éstas rutas de camiones).

Para el caso de la tasa de servicio no se tienen tiempos reglamentados, por lo que con base en los aforos se definió una tasa de servicio constante y uniforme para cada intervalo de 15 minutos de aforo. Por ejemplo si se tienen 5 camiones en una ruta en 15 minutos se asignó una tasa de servicio de 3 minutos, de tal manera que cada 3 minutos sale una nueva unidad. Esto se hizo con cada ruta y en cada lapso de 15 minutos. En la siguientes tablas se ven las tasas de servicio para cada ruta, mostrando en segundos los tiempos correspondientes del periodo, e inicio y fin de la tasa del servicio:

**Tabla 5.4. Tasa de Servicio de TP
MADQ E - Av de la Paz
Fuente: Elaboración Propia, 2015**

Periodo		Camiones	Inicio	Tasa	Fin
Inicio	Fin				
0	900	4	180	180	720
900	1800	4	1080	180	1620
1800	2700	3	2025	225	2475
2700	3600	9	2790	90	3510
3600	4500	4	3780	180	4320
4500	5400	8	4600	100	5300
5400	6300	10	5481	81	6219
6300	7200	8	6400	100	7100
	Total	50			

**Tabla 5.5. Tasa de Servicio de TP
MADQ E - Universidad S
Fuente: Elaboración Propia, 2015**

Periodo		Camiones	Inicio	Tasa	Fin
Inicio	Fin				
0	900	1	450	450	450
900	1800	2	1200	300	1500
1800	2700	2	2100	300	2400
2700	3600	0	3600	900	2700
3600	4500	3	3825	225	4275
4500	5400	1	4950	450	4950
5400	6300	2	5700	300	6000
6300	7200	1	6750	450	6750
	Total	12			

**Tabla 5.6. Tasa de Servicio de TP
Insurgentes S - MADQ E
Fuente: Elaboración Propia, 2015**

Periodo		Camiones	Inicio	Tasa	Fin
Inicio	Fin				
0	900	11	75	75	825
900	1800	15	956	56	1744
1800	2700	2	2100	300	2400
2700	3600	2	3000	300	3300
3600	4500	1	4050	450	4050
4500	5400	6	4628	128	5272
5400	6300	6	5528	128	6172
6300	7200	8	6400	100	7100
	Total	51			

**Tabla 5.7. Tasa de Servicio de TP
Insurgentes S - Universidad S
Fuente: Elaboración Propia, 2015**

Periodo		Camiones	Inicio	Tasa	Fin
Inicio	Fin				
0	900	2	300	300	600
900	1800	1	1350	450	1350
1800	2700	5	1950	150	2550
2700	3600	5	2850	150	3450
3600	4500	3	3825	225	4275
4500	5400	3	4725	225	5175
5400	6300	3	5625	225	6075
6300	7200	4	6480	180	7020
	Total	26			

**Tabla 5.8. Tasa de Servicio de TP
Insurgentes S - Av de La Paz
Fuente: Elaboración Propia, 2015**

Periodo		Camiones	Inicio	Tasa	Fin
Inicio	Fin				
0	900	2	300	300	600
900	1800	3	1125	225	1575
1800	2700	4	1980	180	2520
2700	3600	2	3000	300	3300
3600	4500	3	3825	225	4275
4500	5400	4	4680	180	5220
5400	6300	2	5700	300	6000
6300	7200	3	6525	225	6975
	Total	23			

**Tabla 5.9. Tasa de Servicio de TP
Universidad N - Retorno - MADQ E
Fuente: Elaboración Propia, 2015**

Periodo		Camiones	Inicio	Tasa	Fin
Inicio	Fin				
0	900	2	300	300	600
900	1800	0	1800	900	900
1800	2700	3	2025	225	2475
2700	3600	3	2925	225	3375
3600	4500	3	3825	225	4275
4500	5400	2	4800	300	5100
5400	6300	2	5700	300	6000
6300	7200	6	6428	128	7072
	Total	21			

**Tabla 5.10. Tasa de Servicio de TP
Universidad N - Av de la Paz
Fuente: Elaboración Propia, 2015**

Periodo		Camiones	Inicio	Tasa	Fin
Inicio	Fin				
0	900	1	450	450	450
900	1800	5	1050	150	1650
1800	2700	5	1950	150	2550
2700	3600	1	3150	450	3150
3600	4500	5	3750	150	4350
4500	5400	11	4575	75	5325
5400	6300	5	5550	150	6150
6300	7200	9	6390	90	7110
	Total	42			

**Tabla 5.11. Tasa de Servicio de TP
Universidad S - MADQ E
Fuente: Elaboración Propia, 2015**

Periodo		Camiones	Inicio	Tasa	Fin
Inicio	Fin				
0	900	0	900	900	0
900	1800	0	1800	900	900
1800	2700	2	2100	300	2400
2700	3600	1	3150	450	3150
3600	4500	0	4500	900	3600
4500	5400	2	4800	300	5100
5400	6300	1	5850	450	5850
6300	7200	1	6750	450	6750
	Total	7			

**Tabla 5.12. Tasa de Servicio de TP
Universidad S - Av de la Paz
Fuente: Elaboración Propia, 2015**

Periodo		Camiones	Inicio	Tasa	Fin
Inicio	Fin				
0	900	6	128	128	772
900	1800	3	1125	225	1575
1800	2700	4	1980	180	2520
2700	3600	4	2880	180	3420
3600	4500	5	3750	150	4350
4500	5400	5	4650	150	5250
5400	6300	6	5528	128	6172
6300	7200	8	6400	100	7100
	Total	41			

**Tabla 5.13. Tasa de Servicio de TP
Universidad S - Loop
Fuente: Elaboración Propia, 2015**

Periodo		Camiones	Inicio	Tasa	Fin
Inicio	Fin				
0	900	8	100	100	800
900	1800	5	1050	150	1650
1800	2700	6	1928	128	2572
2700	3600	7	2812	112	3488
3600	4500	6	3728	128	4372
4500	5400	7	4612	112	5288
5400	6300	10	5481	81	6219
6300	7200	12	6369	69	7131
	Total	61			

5.4.2. Paradas

En el corredor pueden verse algunas paradas para el transporte público donde los pasajeros ascienden o descienden, sin embargo es común observar que los buses se detienen además en paradas no asignadas

para su operación. En VISSIM es necesario definir las paradas exactas, por lo que en el modelo éstas paradas se definieron primeramente donde se tienen paraderos oficiales pero también en aquellos puntos clave donde es común ver a los camiones detenerse. A cada parada se le asignó una distribución de tiempo con base a las demoras que se tienen en cada punto. Estos tiempos se asignaron como un promedio aproximado con base a lo que se tiene en la práctica.

A continuación se muestra un diagrama del corredor con la ubicación de las paradas, posteriormente se presenta en una tabla las paradas con sus respectivas distribuciones de tiempo:

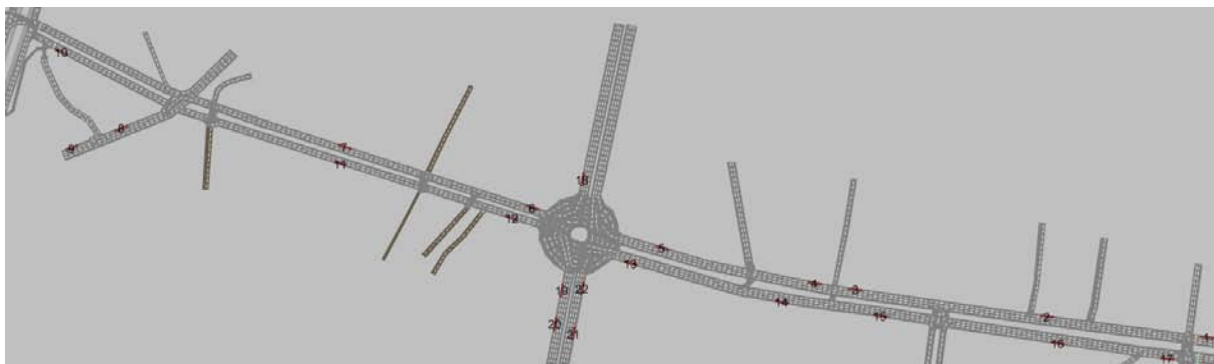


Figura 5.3 Ubicación de Paradas de Transporte Público
Fuente: Elaboración Propia, 2015

Tabla 5.14. Paradas TP Este - Oeste
Fuente: Elaboración Propia, 2015

Número	Ubicación	Distribución
1	Antes de Ignacio Zaragoza	Default
2	Entre las Cerradas Pedregal y MADQ	Default
3	Entre Salvador Novo y Cerro del Hombre	Default
4	Entre Salvador Novo y Panzacola	Default
5	Entre Panzacola y Universidad	Tardada
6	Entre Universidad e Ignacio Allende	Default
7	Entre Ignacio Allende y Arenal	Default

Tabla 5.15. Paradas TP Av. de la Paz - Este
Fuente: Elaboración Propia, 2015

Número	Ubicación	Distribución
8	Entre MADQ y San Luis Potosí	Default
9	Justo antes de Insurgentes	Default

Tabla 5.16. Paradas TP Oeste - Este
Fuente: Elaboración Propia, 2015

Número	Ubicación	Distribución
10	Entre Insurgentes y Av. de la Paz	Default
11	Entre Chimalistac e Ignacio Allende	Default
12	Entre Paseo del Río y Universidad	Default
13	Entre Universidad y Panzacola	Tardada
14	Entre Panzacola y Salvador Novo	Default
15	Entre Salvador Novo y Cerro del Hombre	Default
16	Entre Cerro del Hombre y Kappa	Default
17	Entre Kappa e Ignacio Zaragoza	Default

Tabla 5.17. Paradas TP Norte - Sur
Fuente: Elaboración Propia, 2015

Número	Ubicación	Distribución
18	Antes de la Glorieta	Default
19	Justo después de la Glorieta	Default
20	Después de la Glorieta	Tardada

Tabla 5.18. Paradas TP Sur - Norte
Fuente: Elaboración Propia, 2015

Número	Ubicación	Distribución
21	Antes de la Glorieta	Default
22	Justo Antes de la Glorieta	Default

5.5. SEMÁFOROS

En VISSIM los semáforos funcionan como líneas de alto, por lo que éstos se colocaron en donde los vehículos debían detenerse. Éstos se colocan habiendo previamente definido los controladores con la aplicación que se encuentra dentro del programa. El registro de los tiempos semafóricos fue la base para definir los controladores. Para este caso fue preciso observar con cuidado el comportamiento de los grupos de señales, ya que los semáforos funcionan como líneas de alto se define la programación con base a los grupos de señales. También fue prescindible usar el tiempo de desfase de los semáforos para poder programar a lo largo del tiempo los ciclos semafóricos.

De manera que el resultado consistió en primeramente tener asignados los controladores con los tiempos semafóricos por cada grupo de señal, y posteriormente colocar las “cabezas semafóricas” en donde se necesitara, tomando en cuenta las decisiones de ruta presentes y sus respectivos conectores.

A continuación se muestran los diagramas ingresados a VISSIM, correspondientes a cada intersección semaforizada. Importante aclarar que el controlador de Arenal/Chimalistac y Arenal/Av. de la Paz es el mismo y basta con asignar un solo controlador aunque se vaya a utilizar para dos cruces.

Avenida Insurgentes Sur

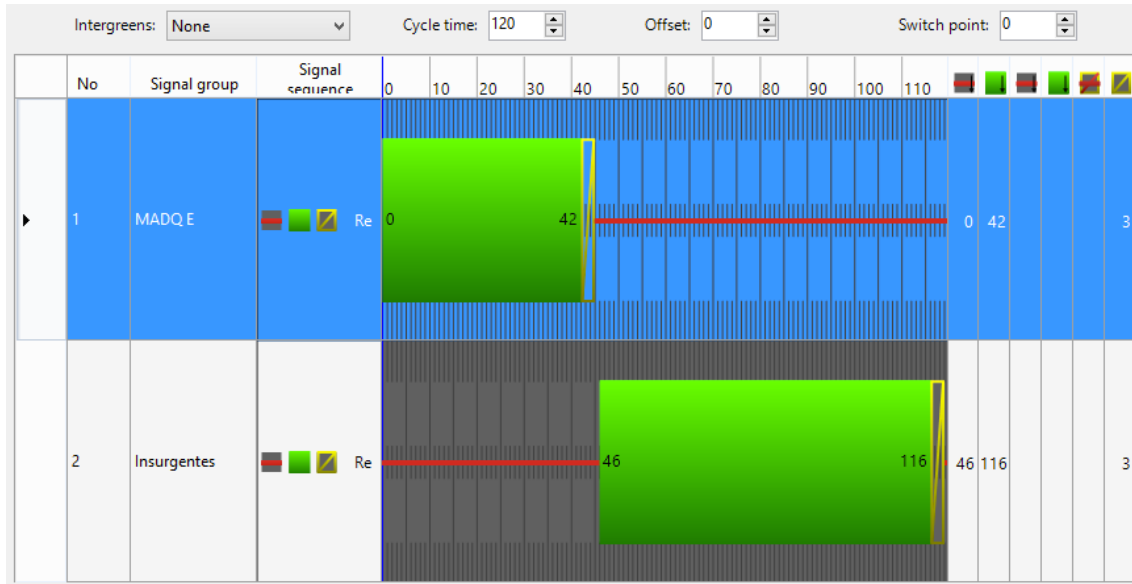


Figura 5.4 Programación Semaforica en el Cruce con Insurgentes Sur
Fuente: Elaboración Propia, 2015

Arenal / Chimalistac

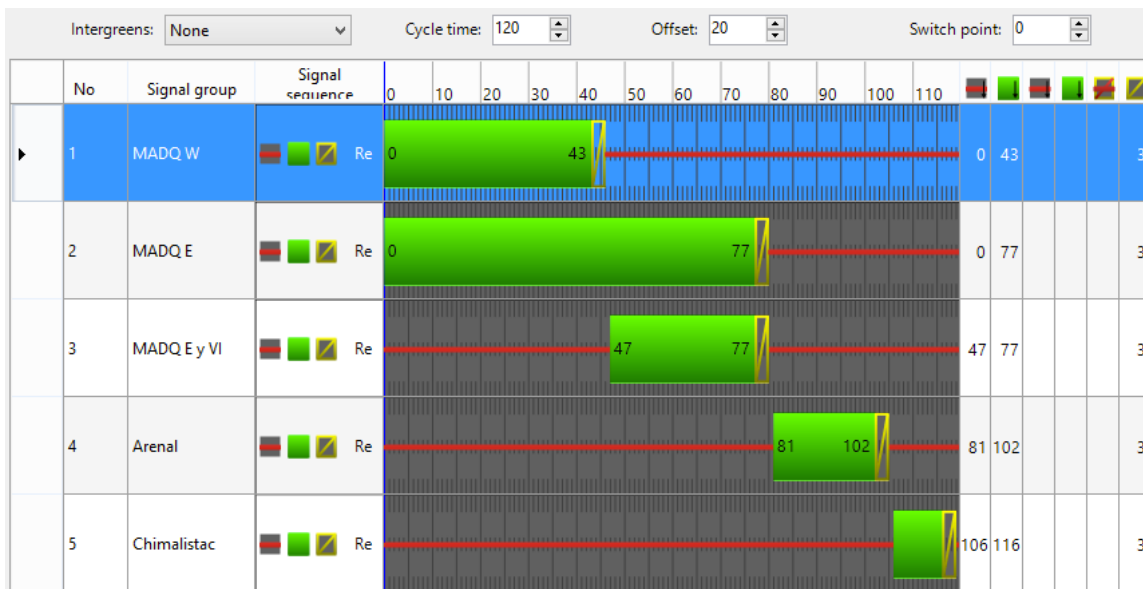


Figura 5.5 Programación Semaforica en el Cruce con Arenal / Chimalistac
Fuente: Elaboración Propia, 2015

Universidad

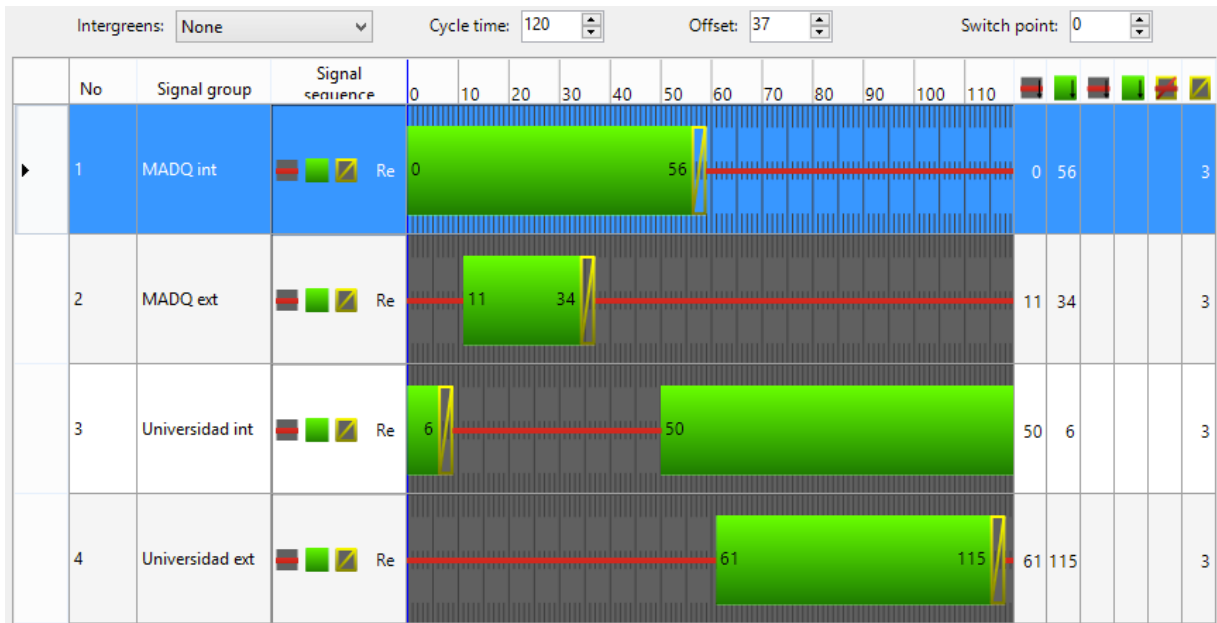


Figura 5.6 Programación Semafórica en el Cruce con Universidad
 Fuente: Elaboración Propia, 2015

Cerro del Hombre

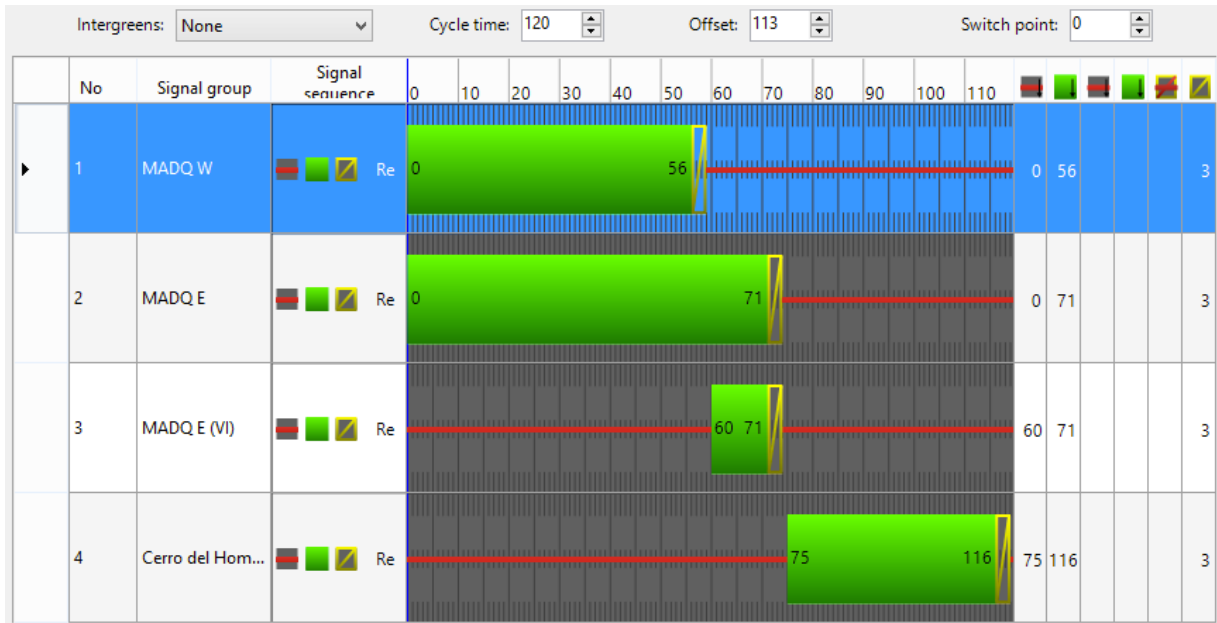


Figura 5.7 Programación Semafórica en el Cruce con Cerro del Hombre
 Fuente: Elaboración Propia, 2015

Ignacio Zaragoza

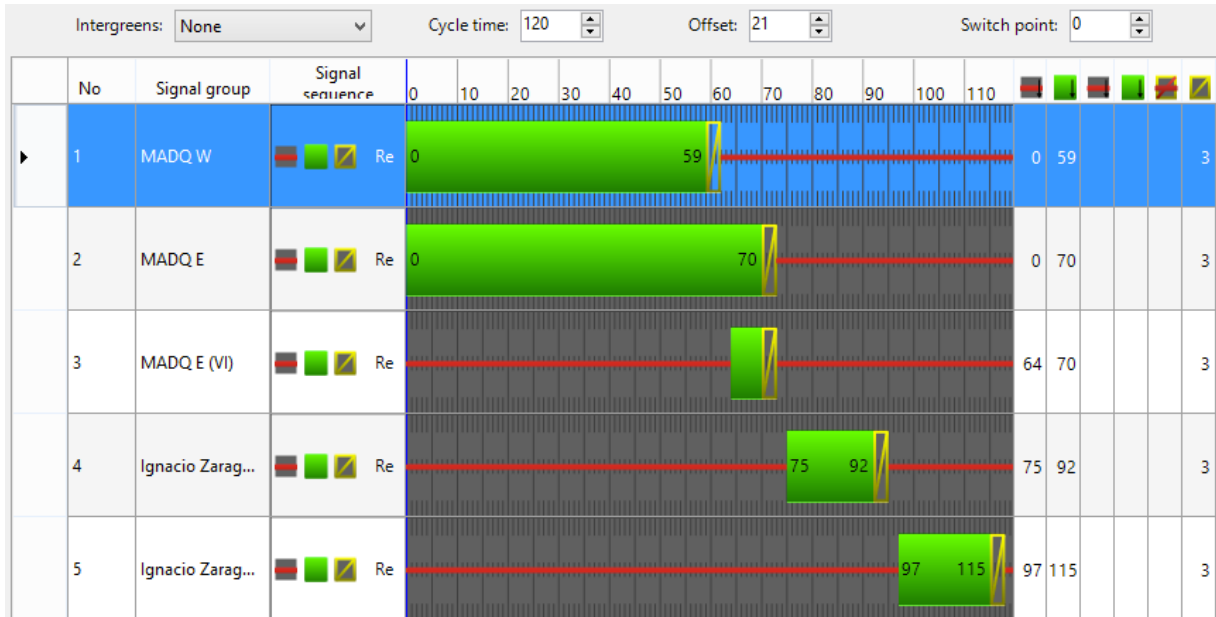


Figura 5.8 Programación Semafórica en el Cruce con Ignacio Zaragoza
Fuente: Elaboración Propia, 2015

5.6. CONSIDERACIONES TÉCNICAS

Las consideraciones técnicas que se tomaron en cuenta tienen como finalidad el hacer en el modelo todo lo posible para que se asemeje más a lo que ocurre en la realidad. En este apartado se mencionará lo que se hizo con las zonas de conflicto, reglas de prioridad, señales de alto, estacionamientos y comportamiento del conductor.

5.6.1. Zonas de Conflicto

Al tener tramos o conectores encima unos de los otros se crea un “conflicto” principalmente ramales o “embudos”. Estas zonas de conflicto se tienen que definir aclarando que vialidad tiene preferencia sobre la otra o si no existen preferencias. Esto es muy similar al comportamiento que se tiene en cruces controlados por señales de alto.

Para el caso en cuestión se resolvieron zonas de conflicto en diferentes segmentos, donde principalmente se le dio prioridad a la avenida principal y a los movimientos por donde pasan la mayoría de automóviles. Estos movimientos por lo general contemplan vueltas en U, incorporaciones a la avenida principal y vueltas izquierdas. Para el caso de la glorieta no se definieron zonas de conflicto ya que fue más simple y preciso trabajar con reglas de prioridad para emular mejor el comportamiento de la glorieta.

5.6.2. Reglas de Prioridad

Las reglas de prioridad tienen como base el ceder el paso de unos vehículos a otros vehículos sin ningún tipo de control. Éstas se definieron principalmente en las vueltas en U y en los cruces con calles secundarias. Además de las zonas de conflicto se definieron las reglas de prioridad para dar una mejor simulación de lo que ocurre en la realidad. En las vueltas en U por ejemplo, se definieron zonas de conflicto, pero además reglas de prioridad. En algunas de las vías secundarias se definieron reglas de prioridad en el carril derecho para que pudieran los vehículos incorporarse a la avenida de manera

segura. Muchas reglas de prioridad se definieron junto a señales de alto para que vehículos pudieran dar vuelta aun estando en rojo y lo hicieran de manera segura. Por otra parte se definieron varias reglas de prioridad en la glorieta, de manera que en la operación de la misma se viera el comportamiento de los vehículos en ella, que consiste en la obstrucción de vehículos por la vialidad, y por ende genera congestión.

5.6.3. Señales de Alto

Las señales de alto se usaron únicamente en las vueltas en U y en las incorporaciones a la avenida principal. En las vueltas en U se colocaron dos señales. La primera se posicionó detrás de los semáforos del carril izquierdo para permitir la vuelta durante el rojo. La segunda se colocó a la mitad del conector para que el vehículo bajara su velocidad y luego continuara con su recorrido. En las incorporaciones a la avenida principal, se colocaron señales de alto a unos pocos metros del entronque, justo antes de la línea roja de la regla de prioridad, esto para reducir la velocidad de los vehículos que llegaban al cruce. Si el cruce tenía semáforo se habilitó la opción de dar vuelta en rojo, para posteriormente incorporarse a la avenida. A continuación se muestra un ejemplo del diseño de una vuelta en U.

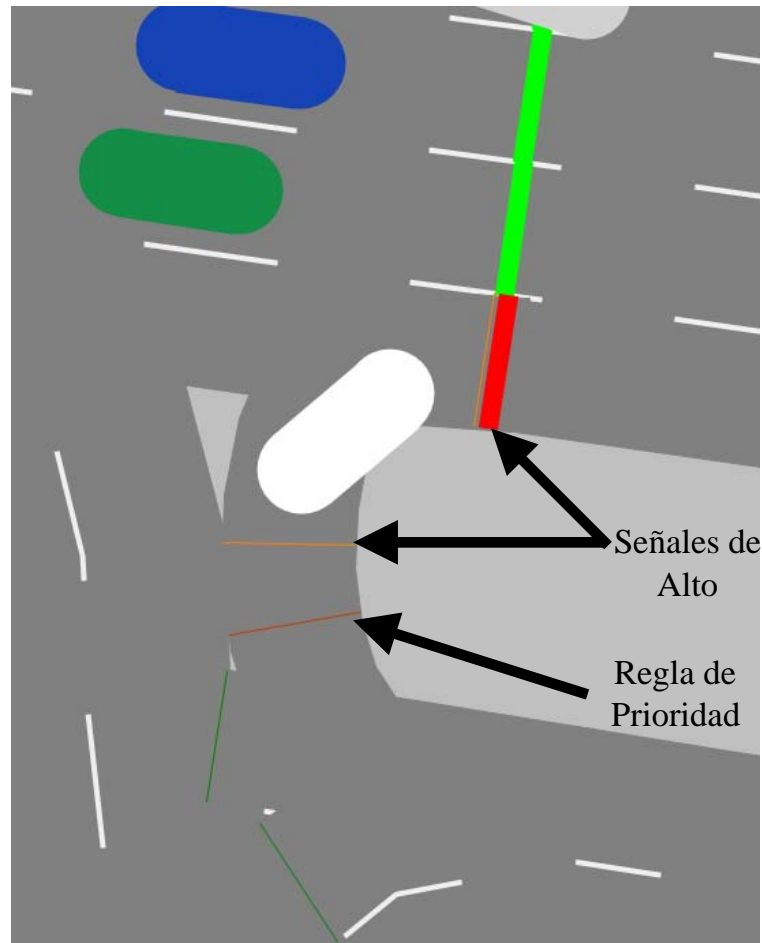


Figura 5.9 Diseño de Vueltas en U
Fuente: Elaboración Propia, 2015

5.6.4. Estacionamientos

Los estacionamientos que se definieron en VISSIM se hicieron en dos partes. La primera parte fue asignar los lugares donde los autos se detienen, mientras que la segunda consiste en asignar decisiones de ruta para estacionamientos, donde los autos deciden estacionarse al pasar por la línea de decisión. Con la observación del corredor en la práctica, se asignaron 7 sitios de estacionamiento de Este a Oeste y 6 sitios de Oeste a Este. En la siguiente pueden verse en color azul las zonas donde se han colocado estacionamiento con su respectiva longitud.

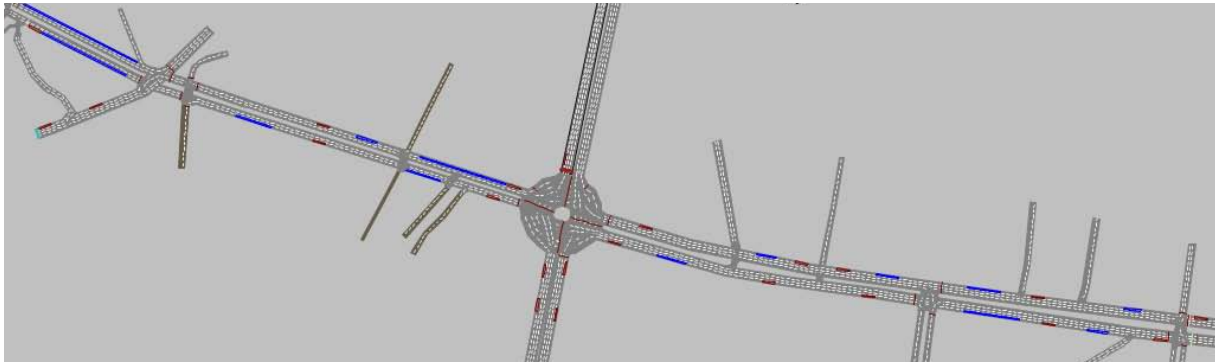


Figura 5.10 Ubicación de Estacionamientos sobre la Avenida
Fuente: Elaboración Propia, 2015

Estos lugares de estacionamiento tienen como función principal obstruir el carril en el que se encuentran y forzar que los vehículos que transitan por ese carril se cambien al de al lado. Entonces los espacios azules corresponden en pocas palabras a un bloqueo del tránsito en el carril donde se encuentran, ya que estos vehículos estacionados permanecen ahí durante todo el tiempo de simulación. Esto es muy similar a lo que ocurre en la realidad, debido a ciertos establecimientos sobre la avenida. es común ver todo el tiempo vehículos estacionados en aquellas regiones.

5.6.5. Comportamiento del Conductor

El comportamiento del conductor en el modelo tuvo un ligero ajuste. Se modificó el factor de reducción para la distancia de seguridad entre autos, que es básicamente un factor de seguridad para el cambio de carril. Dadas las condiciones del tráfico, donde las velocidades se reducen y el ancho del carril es angosto, se observó en la práctica que los vehículos al hacer un cambio de carril guardaban una distancia corta por detrás del vehículo del carril al que hicieron el cambio. Entonces el factor de reducción se cambió de 0.6 (valor default) a 0.2. Esto provoca que los conductores se cambien más fácilmente de carril, reduciendo la distancia de seguridad para hacerlo, cosa que es común en la ciudad de México por la gran cantidad de vehículos. Este cambio en el factor provoca también que en las decisiones de ruta se tenga más facilidad para que todos los vehículos puedan tomar su ruta deseada y no se tengan vehículos que no alcancen su ruta.

5.7. COORDINACIÓN DE LOS TIEMPOS SEMAFÓRICOS

Una vez que el modelo corrió de la manera más similar a la realidad y los resultados de tiempos de recorrido fueran similares, se procedió a trazar diagramas espacio-tiempo para analizar la coordinación semafórica en el corredor. Se analizó el desempeño en cada cruce y se fue proponiendo un desfase de los semáforos para que se coordinaran lo mayor posible. Los valores de los tiempos de verde en cada cruce se mantuvieron iguales para no afectar a las vialidades con las que cruza MADQ. Se hicieron varios intentos de desfase hasta tener la mejor coordinación posible. Los resultados posteriores a la coordinación de los tiempos se muestran, analizan y discuten en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS

6.1. TIEMPOS DE RECORRIDO

En el modelo de microsimulación se colocaron puntos para la medición de tiempos de recorrido. Estos puntos se colocaron a la altura exacta donde se tomaron los tiempos de recorrido en la práctica (ver Cap. 4.4.). De igual manera los tiempos de recorrido se registraron en el mismo intervalo de tiempo que los tiempos medidos en campo. En este caso se tomaron registros entre 8:00 y 8:30 para lograr contar varios vehículos y promediar sus respectivos tiempos.

Se tomaron registros antes y después del ajuste de los tiempos semafóricos para ver la mejoría, la siguiente tabla muestra los resultados que arroja la microsimulación y su comparativa con los medidos en la práctica.

Tabla 6.1. Comparativa de Tiempos de Recorrido
Fuente: Elaboración Propia, 2015

Ruta	Campo	Microsimulación	
		Sin Coordinación	Con Coordinación
E - W	8' 30"	8' 15"	6' 46"
W - E	5' 22"	4' 47"	3' 46"

Como puede verse los valores sin ajustar y los de campo son prácticamente iguales, lo que indica que la microsimulación se asemeja bastante a la realidad. Sin embargo el modelo aun así presenta ciertas diferencias con la realidad, producto de causas que no pueden modelarse tal cual en una simulación, como lo son principalmente obstrucciones en la vialidad por comportamientos agresivos al manejar de los conductores.

Con los datos de campo se calcularon niveles de servicio de F y E para los sentidos E - W y W - E respectivamente (capítulo 4.4). Utilizando el mismo procedimiento se presentan a continuación los niveles de servicio para el modelo de microsimulación para antes y después de la coordinación.

Tabla 6.2. Comparativa de Niveles de Servicio
Fuente: Elaboración Propia, 2015

Ruta	Campo	Microsimulación	
		Sin Coordinación	Con Coordinación
E - W	F	F	F
W - E	E	E	D

Los niveles de servicio son útiles para la interpretación de resultados, sin embargo éstos pueden no representar una mejoría en el servicio, como es el caso ven cuestión. Lo más importante que puede verse es la reducción de tiempos de recorrido al ajustar los valores. El simple hecho de realizar una

coordinación de semáforos con base en los diagramas espacio-tiempo brinda mejoras notorias en los tiempos de recorrido y por ende un mejor servicio en el corredor.

6.2. DIAGRAMAS ESPACIO-TIEMPO

A continuación se desplegarán los diagramas espacio-tiempo generados antes y después del ajuste de los tiempos semafóricos. Cabe mencionar que la coordinación se hizo de la ruta de Este a Oeste, donde se presenta la mayor cantidad de tráfico y flujo de vehículos.

Antes de la Coordinación

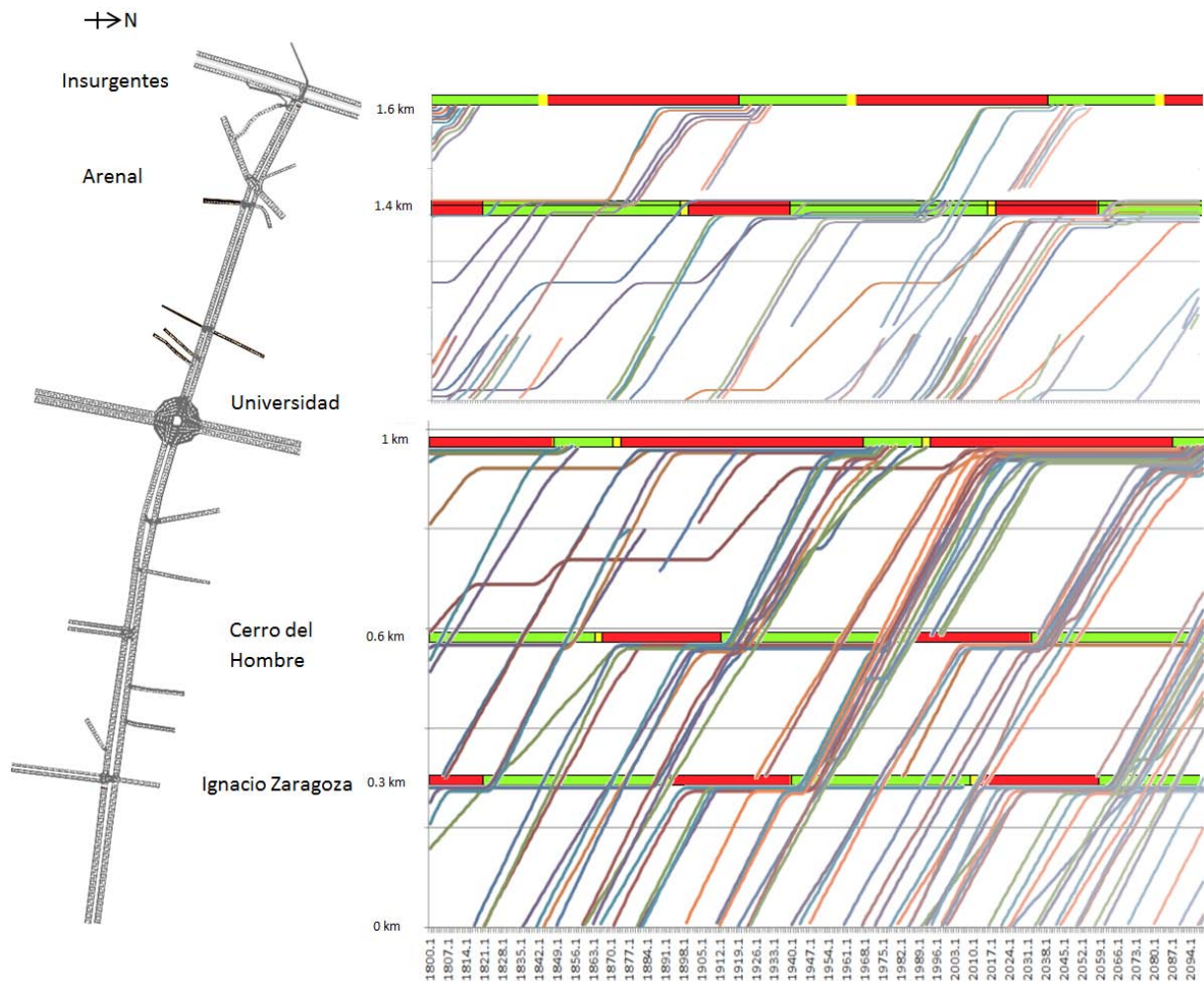


Figura 6.1 Diagrama Espacio-Tiempo Antes de la Coordinación
Fuente: Elaboración Propia, 2015

Después de la Coordinación

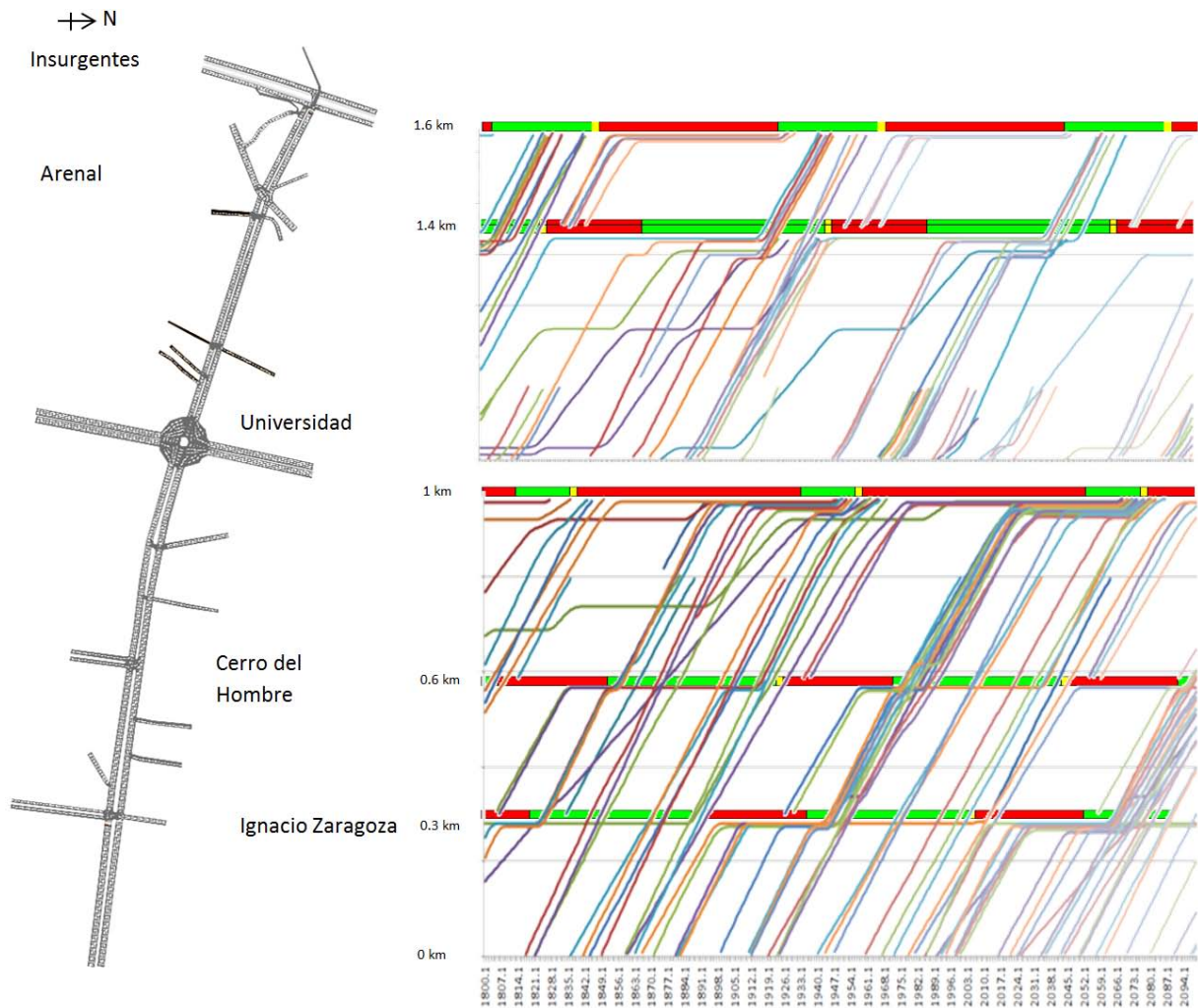


Figura 6.2 Diagrama Espacio Tiempo Después de la Coordinación
Fuente: Elaboración Propia, 2015

6.3. NUEVA PROGRAMACIÓN SEMAFÓRICA

Una vez que se ajustaron los tiempos para lograr la coordinación en los semáforos, los resultados se ven reflejados en los tiempos de desfase de los mismos. Es importante recordar que los tiempos de verde en cada cruce no se cambiaron, lo único que se afectó para lograr la coordinación fueron los tiempos de desfase. A continuación se muestra en la tabla 6.3 una comparativa en donde se aprecia el cambio de desfase en cada semáforo, posteriormente se muestra la programación de las semáforos de VISSIM.

Tabla 6.3. Comparativa de Desfases en los Semáforos
Fuente: Elaboración Propia, 2015

Semáforo	Sin Coordinación (s)	Con Coordinación (s)	Variación (s)
Ignacio Zaragoza	21	21	0
Cerro del Hombre	113	53	-60.0
Universidad	37	14	-23
Arenal	20	68	48.0
Insurgentes	0	4	4

Insurgentes

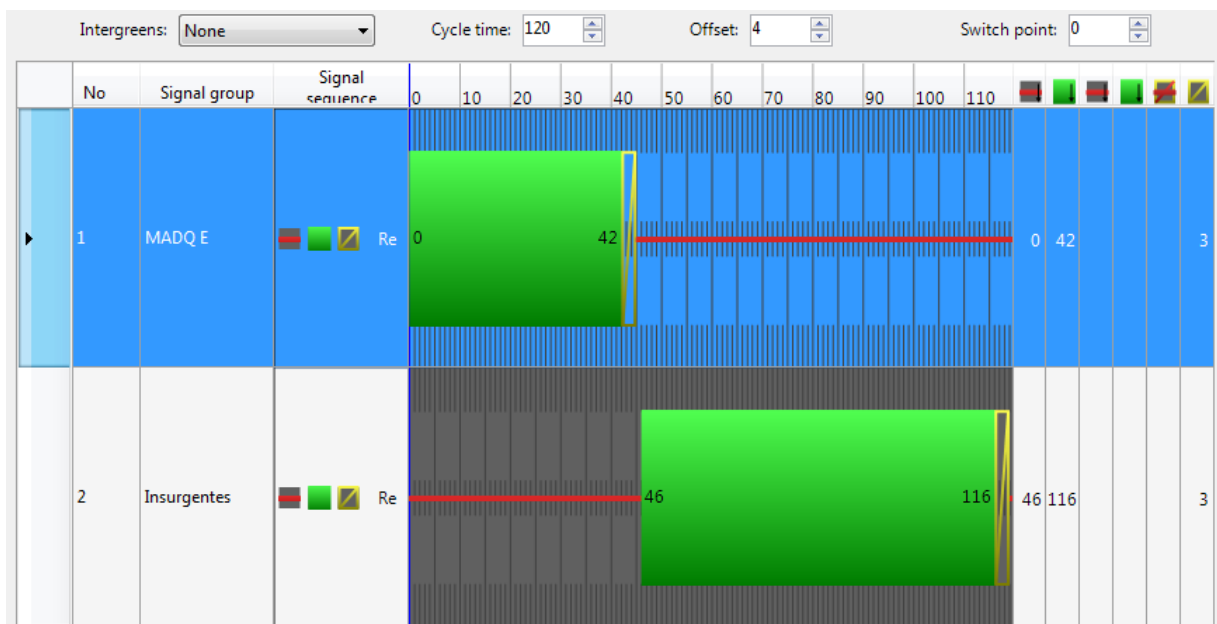


Figura 6.3 Nueva Programación Semafórica en el Cruce con Insurgentes Sur
Fuente: Elaboración Propia, 2015

Arenal

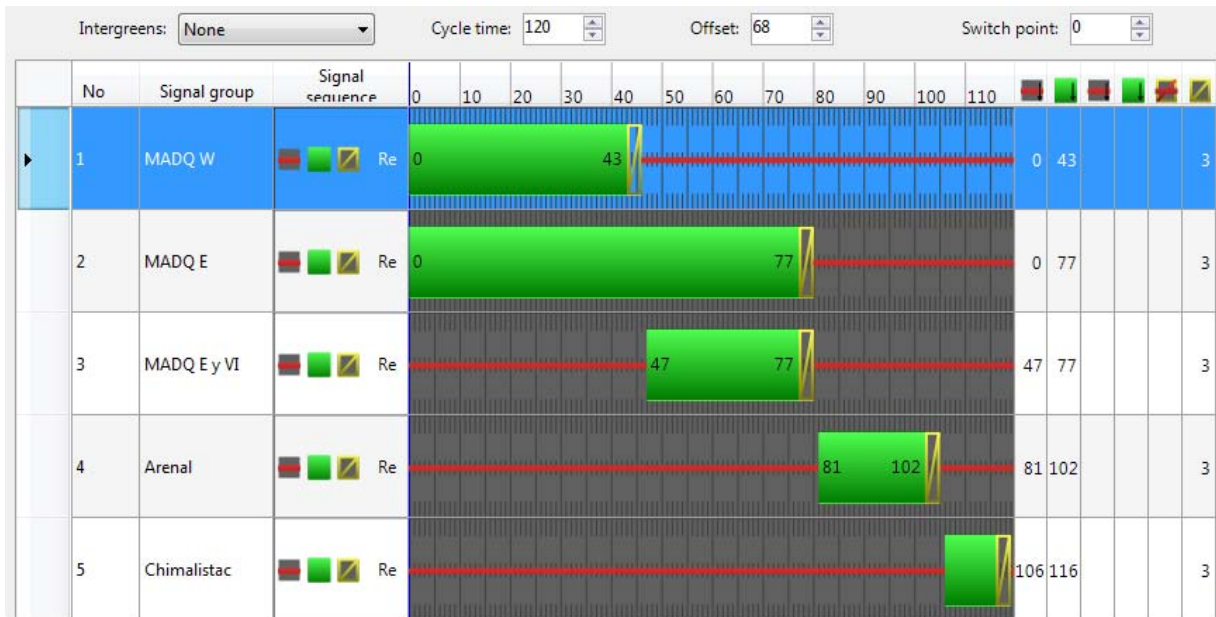


Figura 6.4 Nueva Programación Semafórica en el Cruce con Arenal
 Fuente: Elaboración Propia, 2015

Universidad

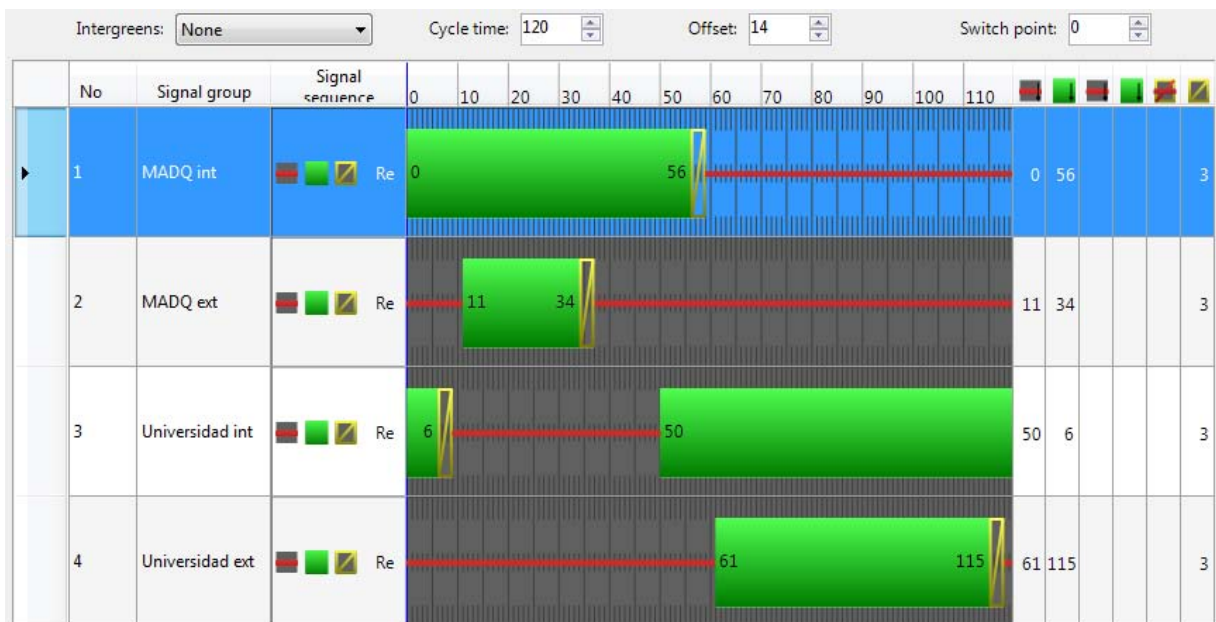


Figura 6.5 Nueva Programación Semafórica en el Cruce con Universidad
 Fuente: Elaboración Propia, 2015

Cerro del Hombre

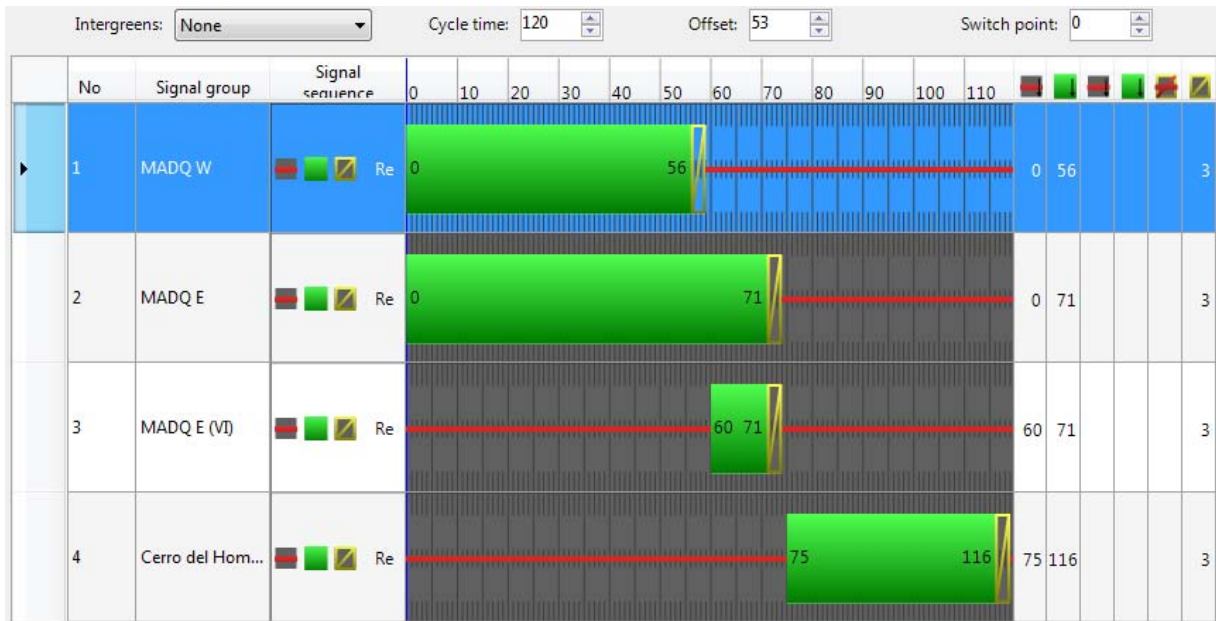


Figura 6.6 Nueva Programación Semafórica en el Cruce con Cerro del Hombre
 Fuente: Elaboración Propia, 2015

Ignacio Zaragoza

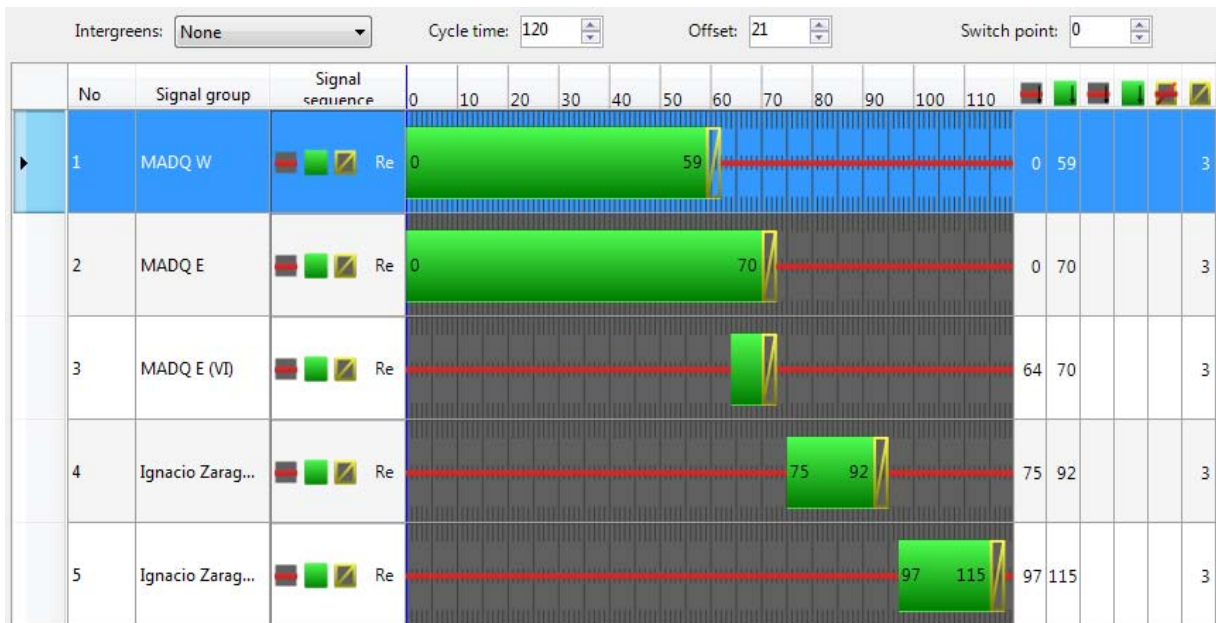


Figura 6.7 Nueva Programación Semafórica en el Cruce con Ignacio Zaragoza
 Fuente: Elaboración Propia, 2015

6.4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Como puede verse en los resultados desplegados anteriormente, los tiempos de recorrido en el trayecto crítico bajan de 8' 15" a 6' 46", significando en una mejoría del 18.1%, mientras que en el tramo que no presenta tráfico bajó de 4' 47" a 3' 46", mejorando un 21.2%. La primera ruta fue la que fue modificándose para encontrar un punto donde el tránsito fluyera, estos cambios hechos beneficiaron también al sentido contrario como pueden verse. Estos resultados comprueban que por el simple hecho de mover el desfase de los tiempos semafóricos se logra mejorar las condiciones del flujo vehicular.

El dato en contra que puede verse es que se siguen presentando demoras en el cruce con avenida Universidad. Este dato puede mostrar que las condiciones en ese cruce son severas. En este cruce se tiene muy poco de tiempo verde para MADQ, esto es lógico si se piensa que el cruce es muy complejo y presenta muchos movimientos. En este caso, no es recomendado tener una glorieta en el cruce de dos avenidas de 4 carriles, esto genera demoras excesivas y una baja tasa de desfogue para la avenida. Como tema de otro estudio podría plantearse una mejor alternativa para ese cruce, quitando la glorieta y proponiendo movimientos que favorezcan la fluidez en ese cruce.

Cabe mencionar que esta adaptación en los tiempo se hizo a mano y para un caso en particular de las condiciones del tráfico registradas. En algunos países el uso de semáforos adaptativos ha ayudado para reducir tiempos de recorrido, niveles de servicio en intersecciones y coordinación semafórica. Se sugiere grandemente que se empleen estos tipos de semáforos en México para mejorar las condiciones viales y disfrutar de todos los beneficios que esto conlleva.

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES

Con base en el capítulo 6 de resultados puedo concluir que se han logrado los objetivos de esta tesis de manera satisfactoria. Se cumplió con el objetivo de coordinar los semáforos y lograr las mejores condiciones de servicio con los recursos que se tienen. Por lo general es recomendable analizar las condiciones del corredor mínimo 2 veces al año, para ajustar siempre los tiempos semafóricos a su mejor estado posible. El resultado de esta tesis indica también que no se han optimizado los tiempos semafóricos en la avenida por un tiempo, ya que éstos pudieron mejorarse en esta tesis.

Las condiciones del tránsito varían a lo largo del tiempo; por ejemplo, en el caso de Miguel Ángel de Quevedo se tendrán ahora condiciones diferentes una vez que opere Plaza Oasis, ubicada cerca del cruce con avenida Universidad. Los aforos de esta tesis se hicieron en octubre del 2014, cuando la plaza estaba en construcción; ahora que ésta empieza a operar, las condiciones serán distintas y los aforos efectuados quedarán obsoletos. Es necesario mantener siempre la información vial actualizada, para así poder vigilar siempre las condiciones del tránsito.

La coordinación de los semáforos obtenida sirve bastante bien por lo menos en el modelo de microsimulación. Esta coordinación llevada a la práctica no necesariamente dará el mismo resultado que el previsto por la microsimulación, siempre el llevar al campo lo realizado en teoría genera cambios importantes, seguramente sería interesante ver operar la avenida con la nueva programación propuesta. Cabe decir también que la microsimulación es considerada la herramienta más precisa en la actualidad para abordar a los temas de la Ingeniería de Tránsito. Ésta arroja resultados muy precisos y prácticos para aplicar en el campo. Los programas de microsimulación se desarrollan en diferentes partes del mundo y se utilizan inconscientemente criterios locales para el desarrollo de estos softwares. VISSIM es un programa desarrollado en Alemania, es de los más reconocidos mundialmente y ha servido ampliamente para los ingenieros de tránsito y urbanistas, sin embargo es importante hacer conciencia sobre esto último que se ha mencionado, las condiciones en Alemania pueden ser muy diferentes a las de México, tan sólo estas pueden observarse en algunos criterios que no pueden modificarse en la microsimulación. Si en México se desarrollara un programa de microsimulación seguramente se tendrían facilidades para asemejar el comportamiento de los vehículos más a lo que ocurre día a día, logrando cosas que cotidianamente pasan sólo en México.

Como parte de los resultados obtenidos puede concluirse también que se puede llegar a mejorías en el tránsito, modificando únicamente las condiciones de operación de los semáforos. Para ello la solución implica no necesariamente la inversión en infraestructura de transporte, como aumentando el número de carriles o construyendo nuevas vías. Estas soluciones son mucho más costosas y durante su construcción generan un gran impacto vial. El uso de tecnologías para el control semafórico muchas veces puede proponer un muy buen cambio en el servicio de las avenidas. La gran ventaja que se tiene en este caso es que siempre se tendrán las mejores condiciones de operación con los recursos disponibles. Cuando estos resultados sean rebasados podrá pensarse más en otro tipo de alternativas.

En lo personal creo yo que en las ciudades muy densas, debe de tenerse disponible siempre la más alta tecnología en la operación del tránsito. Hoy en día esta tecnología puede encontrarse en los semáforos adaptativos, ya que brindarán siempre las mejores condiciones de operación. Cuando este método sea rebasado yo propondría el pensar en otras soluciones, que pueden ir desde la infraestructura, hasta la logística urbana.

En México se tuvo la iniciativa de cambiar todos los semáforos del Distrito Federal por semáforos adaptativos, proyecto denominado “Proyecto Centauro”, mismo que hoy día se encuentra congelado.

Pienso que este tipo de proyectos podría ser de gran ayuda para mejorar las condiciones del tránsito en la ciudad, problemática que involucra a todos los capitalinos día a día y que mundialmente se ha nombrado a la Ciudad de México como la ciudad donde más estrés se presenta por el tráfico. Si no se toman medidas y soluciones eficientes estas condiciones difícilmente podrán cambiar.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Gyimesi, Kalman; Vincent, Charles y Lamba, Naveen. *Frustration Rising: IBM 2011 Commuter Pain Survey*; IBM; 8 septiembre, 2011.
2. Cal y Mayor Reyes Spíndola, Rafael y Cárdenas Grisales, James; *Ingeniería de Tránsito, Fundamentos y Aplicaciones*; Alfaomega; México D.F.; 7a. Edición; 1994.
3. Secretaría de Comunicaciones y Transportes; *Manual de Dispositivos para el Control del Tránsito*; Dirección General de Servicios Técnicos; México; Quinta. Edición; 1986.
4. Secretaría de Comunicaciones y Transportes; *Manual de Dispositivos para el Control del Tránsito*; Dirección General de Servicios Técnicos; México; Quinta. Edición; 1986.
5. Transportation Research Board; *Highway Capacity Manual (HCM)*; National Research Council; Washington D.C.; 2000.
6. Federal Highway Administration; *Traffic Signal Timing Manual*, U.S. Department of Transportation; Publication Number: FHWA-HOP-08-024; Washington D.C.; 2008
7. Md Hadiuzzaman, Rahman, Md Mizanur, and Karim, Md Ahsanul; *Saturation Flow Model at Signalized Intersection for Non-lane Based Traffic*; Canadian Journal of Transportation; journals.lib.unb.ca; May 2009.
8. Gao, Yu; *Calibration and Comparison of the VISSIM and INTEGRATION Microscopic Traffic Simulation Models*; Thesis submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University; Blacksburg, Virginia; 2008.
9. Chavez Tabares, Alexander, Murillo Hoyos, Jackeline y Vega Orozco, Carmen Delia; *Metodología para la Óptima Coordinación de Corredores Viales Semaforizadas Utilizando Software Especializado, Implementado en el Corredor Vial Avenida Sexta Norte de la Ciudad de Santiago de Cali*; Universidad del Valle, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Civil y Geométrica; Santiago de Cali; 2002.
10. Fontalvo Arrieta, Ketty; *Modelación del Tránsito Vehicular con el Software PTV VISSIM Tramo Bomba El Gallo - Bomba El Amparo*; Universidad de Cartagena; Cartagena; 2013.
11. PTV Group; *PTV VISSIM 7 User Manual*; PTV AG; Karlsruhe, Alemania 2014.
12. Kell, James H. and Fullerton, Iris J.; *Manual of Traffic Signal Design*; Second Edition; Institute of Transportation Engineers; Prentice-Hall; Englewoods Cliffs; New Jersey; 1991.
13. Aldape Cantú, Rodolfo, Jalle Alari, José, et al; “*Los semáforos y el control dinámico del tránsito*”; Representaciones y Servicios de Ingeniería; México D.F.; 1976.
14. Chía Fuentes, Liliana y Escalante Torrado, Jesús Orlando; *Modernización de la Red Semafórica de la Ciudad de Bucaramanga Mediante la Implementación de Semáforos Inteligentes*; Universidad Industrial de Santander; Santander; 2011.
15. McShane, William R, Roess, Roger P.; *Traffic Engineering*; Prentice Hall Series in Traffic Engineering; Polytechnic University; New Jersey; 1990.

ANEXO A Resultados de los Aforos

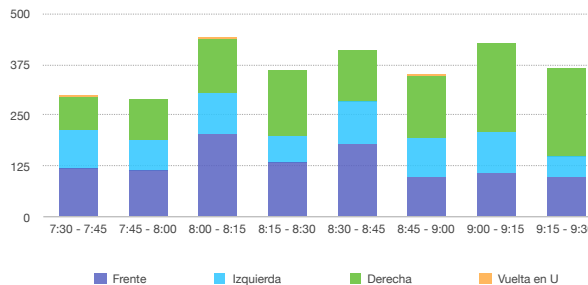
Avenida Insurgentes Sur

Fuente: Elaboración Propia, 2015

Fecha: 15/10/2014

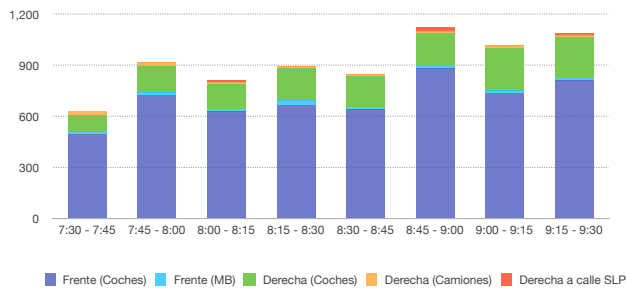
Miguel Ángel de Quevedo (Acceso Este)

INTERVALO	FRENTE	IZQUIERDA	DERECHA	VUELTA EN U
7:30 - 7:45	118	95	82	7
7:45 - 8:00	116	72	101	0
8:00 - 8:15	205	99	133	4
8:15 - 8:30	133	69	159	0
8:30 - 8:45	178	107	126	1
8:45 - 9:00	97	98	153	3
9:00 - 9:15	111	98	215	3
9:15 - 9:30	97	54	213	3
Hora Pico	613	373	571	8



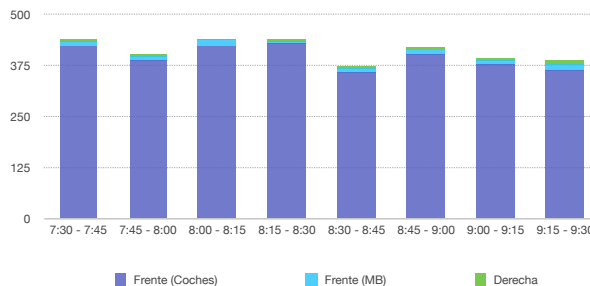
Insurgentes (Acceso Sur)

INTERVALO	FRENTE (COCHES)	FRENTE (MB)	DERECHA (COCHES)	DERECHA (CAMIONES)	DERECHA A CALLE SLP	TOTAL (COCHES)
7:30 - 7:45	498	11	103	15	1	602
7:45 - 8:00	721	21	155	19	4	880
8:00 - 8:15	626	16	150	11	10	786
8:15 - 8:30	672	15	195	9	7	874
8:30 - 8:45	643	12	181	7	9	833
8:45 - 9:00	880	21	187	13	18	1,064
9:00 - 9:15	741	12	248	11	10	999
9:15 - 9:30	811	18	232	15	12	1,055
Hora Pico	2,821	43	713	40	44	3,557



Insurgentes (Acceso Norte)

INTERVALO	FRENTE (COCHES)	FRENTE (MB)	DERECHA	TOTAL (COCHES)
7:30 - 7:45	423	12	2	425
7:45 - 8:00	388	11	2	390
8:00 - 8:15	425	13	2	427
8:15 - 8:30	427	9	3	430
8:30 - 8:45	359	8	4	363
8:45 - 9:00	401	14	2	403
9:00 - 9:15	377	12	2	379
9:15 - 9:30	365	13	11	376
Hora Pico	1,612	44	11	1,623



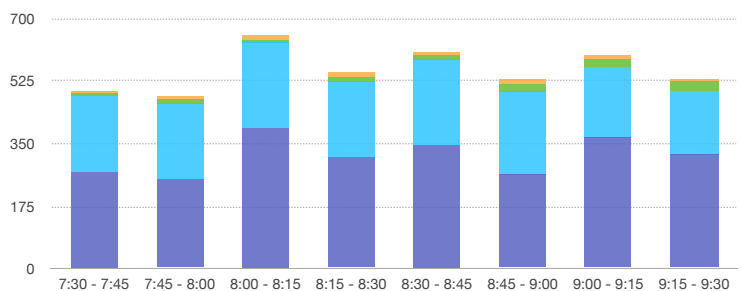
Avenida de la Paz / Arenal / Lombardo Toledano

Fuente: Elaboración Propia, 2015

Fecha: 22/10/2014

Miguel Ángel de Quevedo (Acceso Este)

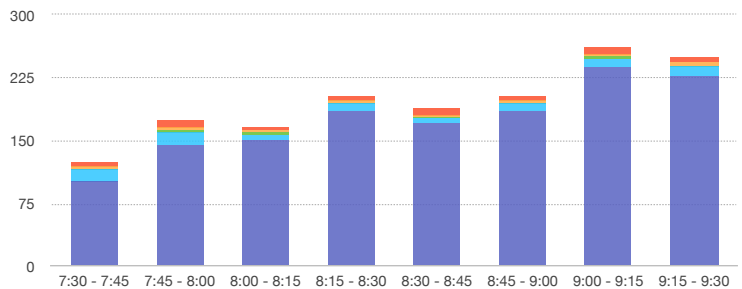
INTERVALO	FRENTE (COCHES)	IZQUIERDA (COCHES)	IZQUIERDA (CAMIONES)	DERECHA A LOMBARDO T.
7:30 - 7:45	271	209	11	6
7:45 - 8:00	250	214	12	5
8:00 - 8:15	392	238	12	10
8:15 - 8:30	315	210	14	11
8:30 - 8:45	345	237	14	7
8:45 - 9:00	266	227	24	11
9:00 - 9:15	368	197	21	12
9:15 - 9:30	319	179	25	8
Hora Pico	1,318	912	64	39



■ Frente (Coches) ■ Izquierda (Coches) ■ Izquierda (Camiones) ■ Derecha a Lombardo T.

Miguel Ángel de Quevedo (Acceso Oeste)

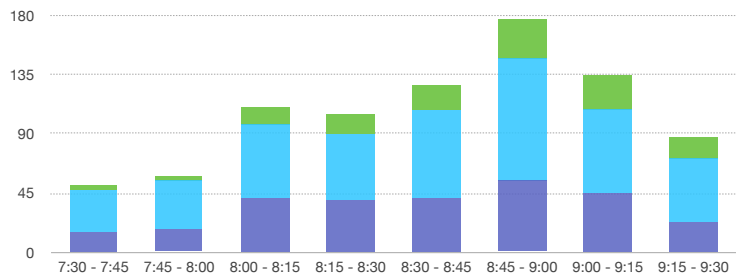
INTERVALO	FRENTE (COCHES)	FRENTE (CAMIONES)	DERECHA (COCHES)	DERECHA (CAMIONES)	VUELTA EN U
7:30 - 7:45	102	13	2	2	6
7:45 - 8:00	145	16	2	3	8
8:00 - 8:15	150	7	2	4	2
8:15 - 8:30	187	7	1	2	7
8:30 - 8:45	172	4	2	3	8
8:45 - 9:00	185	9	1	4	4
9:00 - 9:15	239	9	3	2	9
9:15 - 9:30	226	12	2	3	7
Hora Pico	694	27	6	13	21



■ Frente (Coches) ■ Frente (Camiones) ■ Derecha (Coches) ■ Derecha (Camiones) ■ Vuelta en U

Arenal (Acceso Norte)

INTERVALO	FRENTE	DERECHA	DERECHA A LOMBARDO T.	TOTAL
7:30 - 7:45	16	31	3	50
7:45 - 8:00	18	36	4	58
8:00 - 8:15	41	57	13	111
8:15 - 8:30	40	50	15	105
8:30 - 8:45	42	66	18	126
8:45 - 9:00	55	92	30	177
9:00 - 9:15	46	62	27	135
9:15 - 9:30	23	49	15	87
Hora Pico	178	265	76	519



■ Frente ■ Derecha ■ Derecha a Lombardo T.

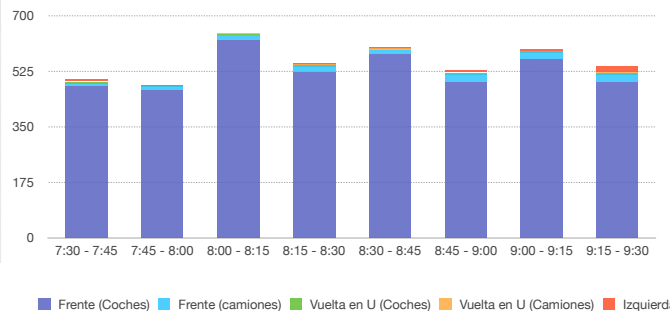
Chimalistac / Arenal

Fuente: Elaboración Propia, 2015

Fecha: 29/10/2014

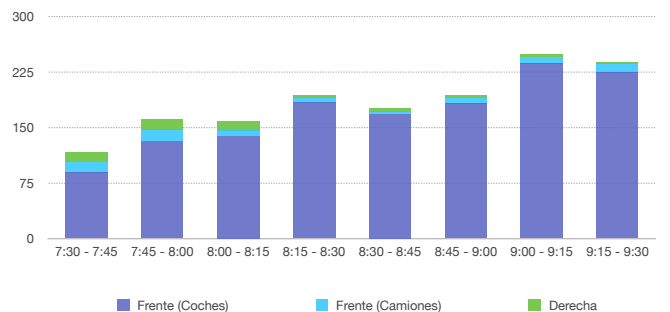
Miguel Ángel de Quevedo (Acceso Este)

INTERVALO	FRENTE (COCHES)	FRENTE (CAMIONES)	VUELTA EN U (COCHES)	VUELTA EN U (CAMIONES)	IZQUIERDA
7:30 - 7:45	476	11	4	2	3
7:45 - 8:00	463	12	3	0	4
8:00 - 8:15	624	12	4	3	2
8:15 - 8:30	523	14	6	3	5
8:30 - 8:45	577	14	2	3	3
8:45 - 9:00	490	24	5	2	5
9:00 - 9:15	561	21	4	2	9
9:15 - 9:30	488	25	3	6	15
Hora Pico	2,214	64	17	11	15



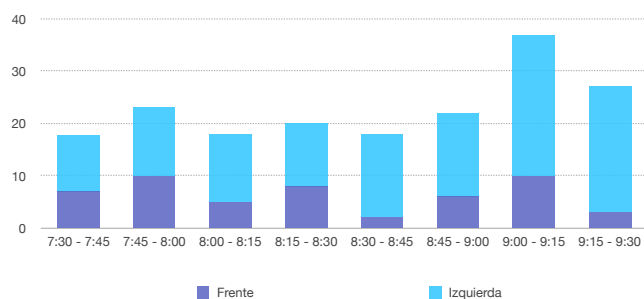
Miguel Ángel de Quevedo (Acceso Oeste)

INTERVALO	FRENTE (COCHES)	FRENTE (CAMIONES)	DERECHA
7:30 - 7:45	90	13	12
7:45 - 8:00	131	16	14
8:00 - 8:15	138	7	12
8:15 - 8:30	183	7	4
8:30 - 8:45	167	4	5
8:45 - 9:00	182	9	3
9:00 - 9:15	236	9	3
9:15 - 9:30	223	12	3
Hora Pico	670	27	24



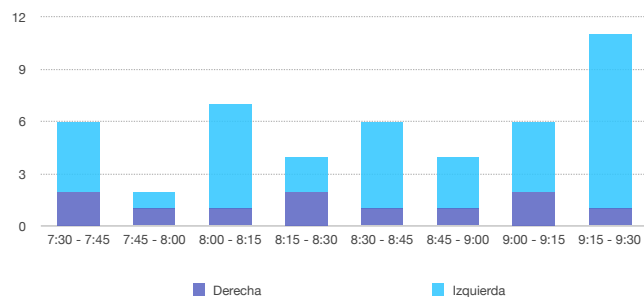
Arenal (Acceso Norte)

INTERVALO	FRENTE	IZQUIERDA	TOTAL
7:30 - 7:45	7	11	18
7:45 - 8:00	10	13	23
8:00 - 8:15	5	13	18
8:15 - 8:30	8	12	20
8:30 - 8:45	2	16	18
8:45 - 9:00	6	16	22
9:00 - 9:15	10	27	37
9:15 - 9:30	3	24	27
Hora Pico	21	57	78



Chimalistac (Acceso Sur)

INTERVALO	DERECHA	IZQUIERDA	TOTAL
7:30 - 7:45	2	4	6
7:45 - 8:00	1	1	2
8:00 - 8:15	1	6	7
8:15 - 8:30	2	2	4
8:30 - 8:45	1	5	6
8:45 - 9:00	1	3	4
9:00 - 9:15	2	4	6
9:15 - 9:30	1	10	11
Hora Pico	5	16	21



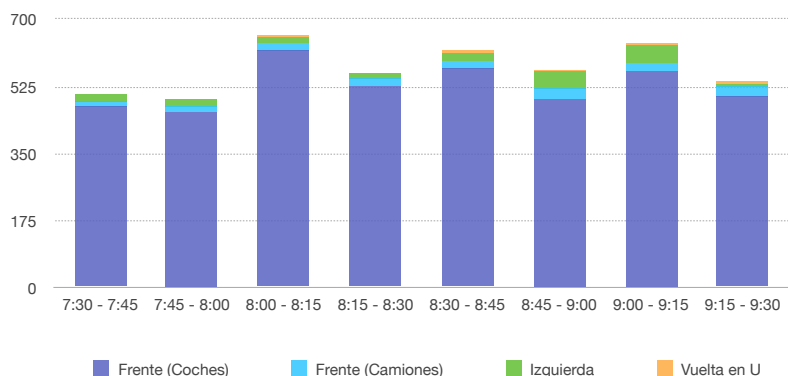
Paseo del Río

Fuente: Elaboración Propia, 2015

Fecha: 5/11/2014

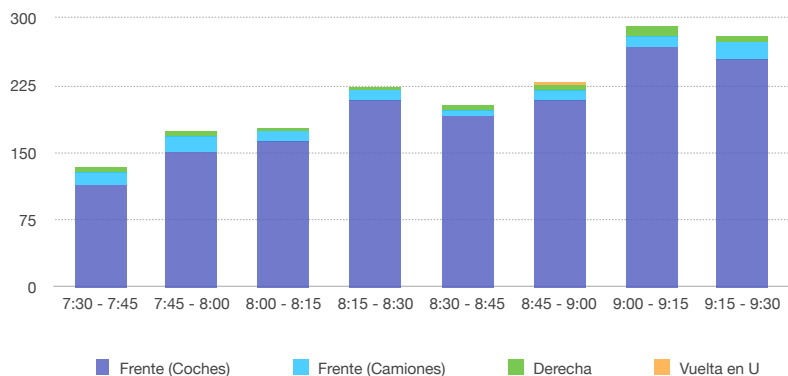
Miguel Ángel de Quevedo (Acceso Este)

INTERVALO	FRENTE (COCHES)	FRENTE (CAMIONES)	IZQUIERDA	VUELTA EN U
7:30 - 7:45	475	13	16	0
7:45 - 8:00	462	12	16	0
8:00 - 8:15	622	15	19	3
8:15 - 8:30	526	17	18	1
8:30 - 8:45	574	17	23	3
8:45 - 9:00	491	26	48	3
9:00 - 9:15	565	23	43	6
9:15 - 9:30	497	31	8	3
Hora Pico	2,213	75	108	10



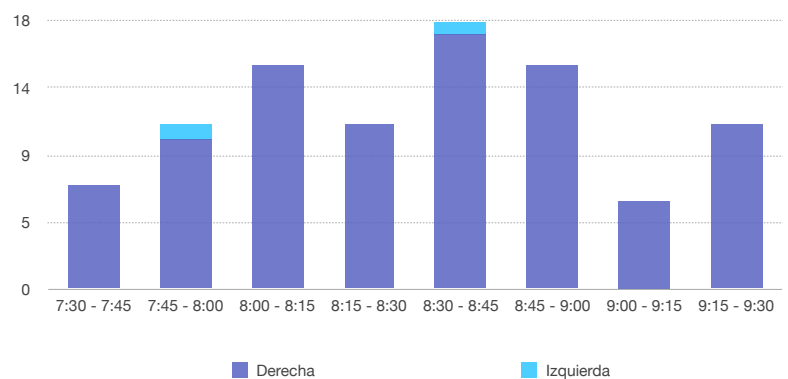
Miguel Ángel de Quevedo (Acceso Oeste)

INTERVALO	FRENTE (COCHES)	FRENTE (CAMIONES)	DERECHA	VUELTA EN U
7:30 - 7:45	114	15	4	0
7:45 - 8:00	151	16	8	0
8:00 - 8:15	164	10	3	0
8:15 - 8:30	209	10	5	0
8:30 - 8:45	191	7	6	0
8:45 - 9:00	208	11	7	1
9:00 - 9:15	269	11	11	1
9:15 - 9:30	255	18	7	1
Hora Pico	772	38	21	1



Paseo del Río (Acceso Sur)

INTERVALO	DERECHA	IZQUIERDA	TOTAL
7:30 - 7:45	7	0	7
7:45 - 8:00	10	1	11
8:00 - 8:15	15	0	15
8:15 - 8:30	11	0	11
8:30 - 8:45	17	1	18
8:45 - 9:00	15	0	15
9:00 - 9:15	6	0	6
9:15 - 9:30	11	0	11
Hora Pico	58	1	59



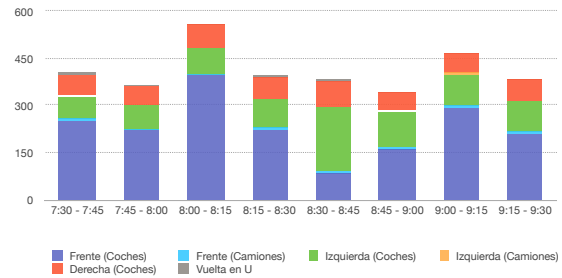
Avenida Universidad

Fuente: Elaboración Propia, 2015

Fecha: 12,26/11/2014

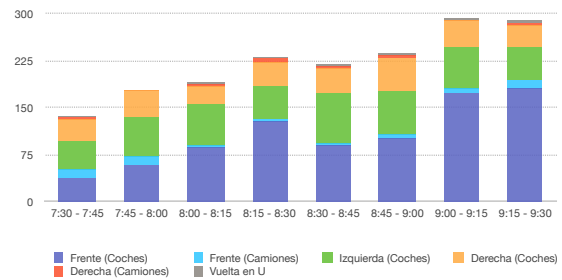
Miguel Ángel de Quevedo (Acceso Este)

INTERVALO	FRENTE (COCHES)	FRENTE (CAMIONES)	IZQUIERDA (COCHES)	IZQUIERDA (CAMIONES)	DERECHA (COCHES)	VUELTA EN U	TOTAL
7:30 - 7:45	253	4	74	1	68	4	404
7:45 - 8:00	222	4	71	2	62	3	364
8:00 - 8:15	395	3	84	2	73	3	560
8:15 - 8:30	221	9	90	0	71	4	395
8:30 - 8:45	84	4	202	3	86	4	383
8:45 - 9:00	159	8	115	1	58	4	345
9:00 - 9:15	290	10	100	2	63	3	468
9:15 - 9:30	207	8	98	1	69	2	385
Hora Pico	859	24	491	6	288	15	1,683



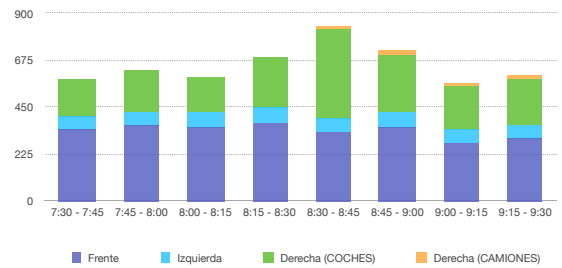
Miguel Ángel de Quevedo (Acceso Oeste)

INTERVALO	FRENTE (COCHES)	FRENTE (CAMIONES)	IZQUIERDA (COCHES)	DERECHA (COCHES)	DERECHA (CAMIONES)	VUELTA EN U	TOTAL
7:30 - 7:45	37	13	46	37	2	1	136
7:45 - 8:00	58	15	61	42	1	0	177
8:00 - 8:15	86	5	64	28	5	4	192
8:15 - 8:30	127	5	53	38	5	3	231
8:30 - 8:45	91	4	80	37	3	3	218
8:45 - 9:00	100	8	68	55	3	3	237
9:00 - 9:15	173	8	64	42	3	2	292
9:15 - 9:30	182	14	52	34	4	1	287
Hora Pico	404	22	265	158	16	13	878



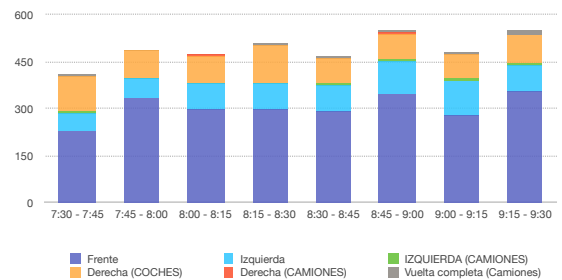
Universidad (Acceso Norte)

INTERVALO	FRENTE	IZQUIERDA	DERECHA (COCHES)	DERECHA (CAMIONES)	TOTAL (COCHES)	TOTAL
7:30 - 7:45	347	57	181	3	585	588
7:45 - 8:00	368	60	196	5	624	629
8:00 - 8:15	359	71	162	8	592	600
8:15 - 8:30	376	76	238	4	690	694
8:30 - 8:45	336	63	428	8	827	835
8:45 - 9:00	352	74	279	13	705	718
9:00 - 9:15	277	67	210	7	554	561
9:15 - 9:30	306	62	220	15	588	603
Hora Pico	1,423	284	1,107	33	2,814	2,847



Universidad (Acceso Sur)

INTERVALO	FRENTE	IZQUIERDA	IZQUIERDA (CAMIONES)	DERECHA (COCHES)	DERECHA (CAMIONES)	VUELTA COMPLETA (CAMIONES)	TOTAL (COCHES)	TOTAL
7:30 - 7:45	229	56	6	113	0	8	398	412
7:45 - 8:00	337	60	3	86	0	5	483	491
8:00 - 8:15	298	83	4	84	2	6	465	477
8:15 - 8:30	297	83	4	117	1	7	497	509
8:30 - 8:45	292	85	5	79	0	6	456	467
8:45 - 9:00	351	101	5	83	2	7	535	549
9:00 - 9:15	277	112	6	76	1	10	465	482
9:15 - 9:30	358	80	8	90	1	12	528	549
Hora Pico	1,238	352	18	363	5	26	1,953	2,002



Hora Pico

INTERVALO	MADQ E	MADQ W	UNIVERSIDAD N	UNIVERSIDAD S	TOTAL
7:30 - 8:30	1,723	736	2,511	1,889	6,859
7:45 - 8:45	1,702	818	2,758	1,944	7,222
8:00 - 9:00	1,683	878	2,847	2,002	7,410
8:15 - 9:15	1,591	978	2,808	2,007	7,384
8:30 - 9:30	1,581	1,034	2,717	2,047	7,379

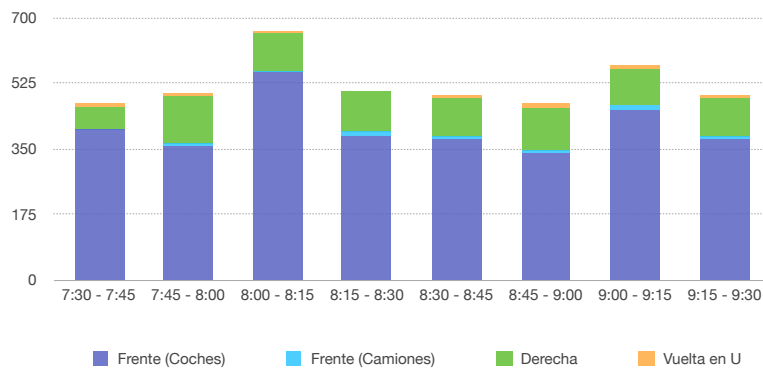
Panzacola

Fuente: Elaboración Propia, 2015

Fecha: 24/09/2014

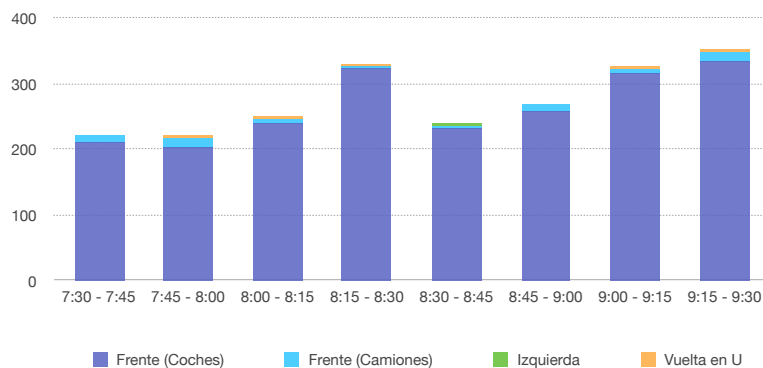
Miguel Ángel de Quevedo (Acceso Este)

INTERVALO	FRENTE (COCHES)	FRENTE (CAMIONES)	DERECHA	VUELTA EN U
7:30 - 7:45	399	5	57	8
7:45 - 8:00	355	6	126	7
8:00 - 8:15	552	5	101	4
8:15 - 8:30	384	9	108	4
8:30 - 8:45	373	7	105	8
8:45 - 9:00	335	9	114	12
9:00 - 9:15	453	12	97	9
9:15 - 9:30	373	9	104	3
Hora Pico	1,644	30	428	28



Miguel Ángel de Quevedo (Acceso Oeste)

INTERVALO	FRENTE (COCHES)	FRENTE (CAMIONES)	IZQUIERDA	VUELTA EN U
7:30 - 7:45	210	13	1	0
7:45 - 8:00	203	15	1	3
8:00 - 8:15	240	7	1	3
8:15 - 8:30	322	6	0	2
8:30 - 8:45	232	4	2	3
8:45 - 9:00	259	10	1	1
9:00 - 9:15	315	9	1	3
9:15 - 9:30	333	15	0	3
Hora Pico	1,053	27	4	9



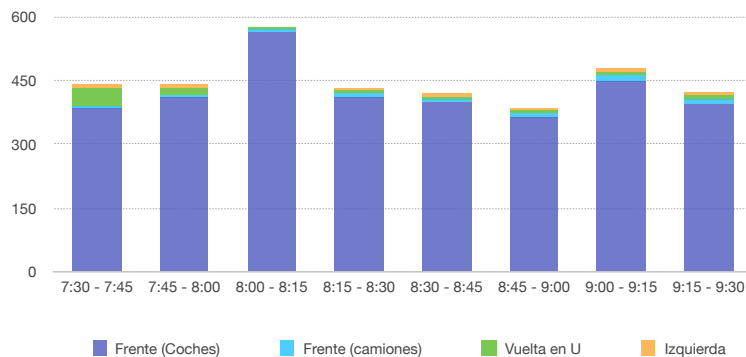
Cerro Del Hombre

Fuente: Elaboración Propia, 2015

Fecha: 8/10/2014

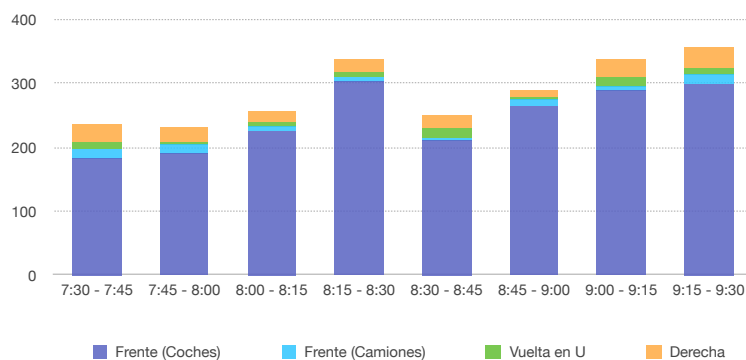
Miguel Ángel de Quevedo (Acceso Este)

INTERVALO	FRENTE (COCHES)	FRENTE (CAMIONES)	VUELTA EN U	IZQUIERDA
7:30 - 7:45	382	5	43	13
7:45 - 8:00	408	6	16	11
8:00 - 8:15	562	5	5	4
8:15 - 8:30	412	9	6	6
8:30 - 8:45	400	7	3	11
8:45 - 9:00	363	9	4	8
9:00 - 9:15	449	12	8	11
9:15 - 9:30	395	9	11	8
Hora Pico	1,737	30	18	29



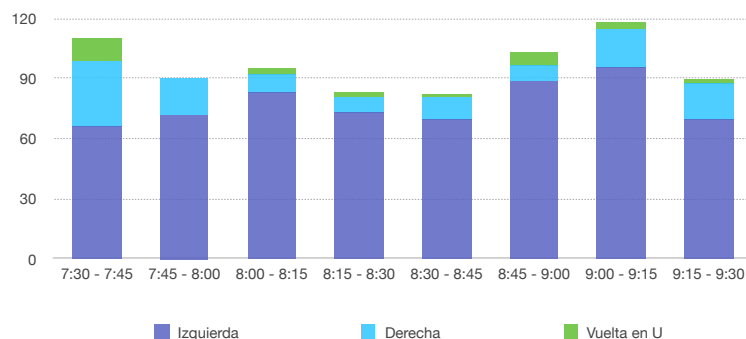
Miguel Ángel de Quevedo (Acceso Oeste)

INTERVALO	FRENTE (COCHES)	FRENTE (CAMIONES)	VUELTA EN U	DERECHA
7:30 - 7:45	183	13	13	28
7:45 - 8:00	189	15	5	22
8:00 - 8:15	225	7	9	16
8:15 - 8:30	303	6	8	21
8:30 - 8:45	211	4	13	22
8:45 - 9:00	263	10	6	8
9:00 - 9:15	288	9	12	30
9:15 - 9:30	298	15	12	32
Hora Pico	1,002	27	36	67



Cerro del Hombre al Norte (Acceso Sur)

INTERVALO	IZQUIERDA	DERECHA	VUELTA EN U	TOTAL
7:30 - 7:45	66	33	11	110
7:45 - 8:00	72	18	0	90
8:00 - 8:15	83	9	3	95
8:15 - 8:30	73	8	2	83
8:30 - 8:45	70	11	1	82
8:45 - 9:00	89	8	6	103
9:00 - 9:15	95	19	4	118
9:15 - 9:30	70	18	2	90
Hora Pico	315	36	12	363



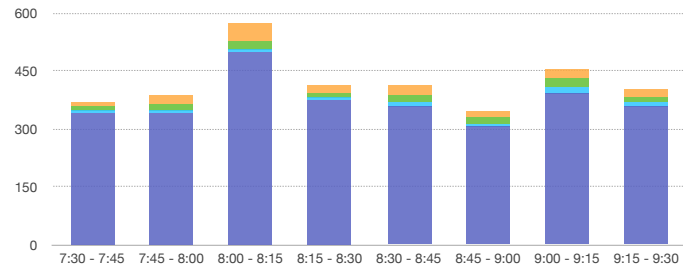
Ignacio Zaragoza

Fuente: Elaboración Propia, 2015

Fecha: 1/10/2014

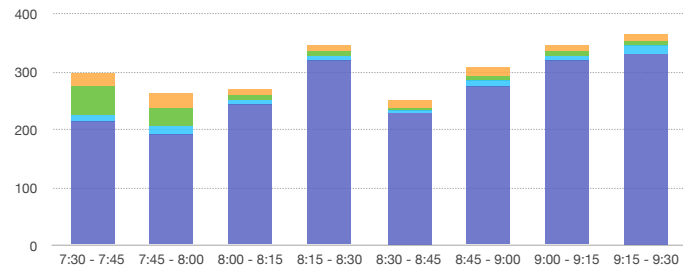
Miguel Ángel de Quevedo (Acceso Este)

INTERVALO	FRENTE (COCHES)	FRENTE (CAMIONES)	VUELTA EN U	IZQUIERDA	TOTAL (COCHES)
7:30 - 7:45	339	5	11	16	366
7:45 - 8:00	343	6	15	20	378
8:00 - 8:15	498	5	24	44	566
8:15 - 8:30	373	9	11	24	408
8:30 - 8:45	360	7	17	29	406
8:45 - 9:00	304	9	19	15	338
9:00 - 9:15	394	12	26	23	443
9:15 - 9:30	359	9	13	21	393
Hora Pico	1,535	30	71	112	1,718



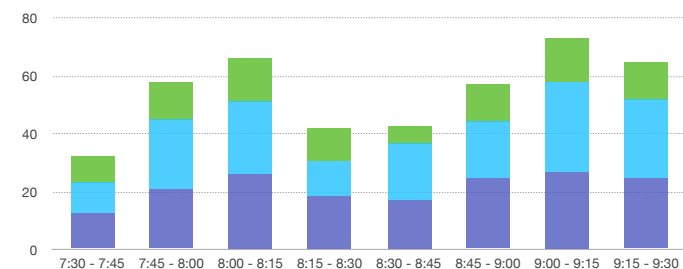
Miguel Ángel de Quevedo (Acceso Oeste)

INTERVALO	FRENTE (COCHES)	FRENTE (CAMIONES)	VUELTA EN U	DERECHA
7:30 - 7:45	214	13	48	21
7:45 - 8:00	191	15	32	24
8:00 - 8:15	245	7	9	9
8:15 - 8:30	321	6	8	12
8:30 - 8:45	229	4	5	15
8:45 - 9:00	276	10	9	14
9:00 - 9:15	320	9	7	12
9:15 - 9:30	330	15	8	13
Hora Pico	1,071	27	31	50



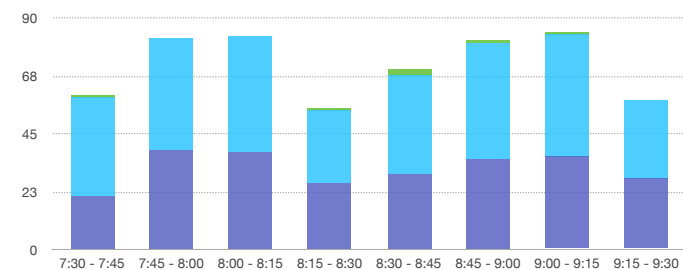
Ignacio Zaragoza (Acceso Norte)

INTERVALO	FRENTE	IZQUIERDA	DERECHA	TOTAL
7:30 - 7:45	13	10	9	32
7:45 - 8:00	21	24	13	58
8:00 - 8:15	26	25	15	66
8:15 - 8:30	19	12	11	42
8:30 - 8:45	17	20	6	43
8:45 - 9:00	25	19	13	57
9:00 - 9:15	27	31	15	73
9:15 - 9:30	25	27	13	65
Hora Pico	87	76	45	208



Ignacio Zaragoza (Acceso Sur)

INTERVALO	DERECHA	IZQUIERDA	VUELTA EN U	TOTAL
7:30 - 7:45	21	38	1	60
7:45 - 8:00	39	43	0	82
8:00 - 8:15	38	45	0	83
8:15 - 8:30	26	28	1	55
8:30 - 8:45	29	39	2	70
8:45 - 9:00	35	45	1	81
9:00 - 9:15	36	48	1	85
9:15 - 9:30	28	30	0	58
Hora Pico	128	157	4	289



Aforos Parciales de 15 Minutos(Ignacio Allende, Salvador Novo, Cerrada Miguel Ángel de Quevedo, Cerrada Pedregal y Kappa)**Fuente:** Elaboración Propia, 2015

Fecha: 19/11/2014

Cerrada Miguel Ángel de Quevedo

INTERVALO	ENTRAN	SALEN
15 min	1	2
Horario	4	8

Cerrada Pedregal

INTERVALO	ENTRAN	SALEN
15 min	2	5
Horario	8	20

Kappa

INTERVALO	SALEN
15 min	24
Horario	96

Salvador Novo

INTERVALO	DERECHA
15 min	9
Horario	36

Ignacio Allende (Acceso Norte)

INTERVALO	DERECHA	IZQUIERDA
15 min	1	4
Horario	4	16

Ignacio Allende (Acceso Sur)

INTERVALO	DERECHA	IZQUIERDA
15 min	8	6
Horario	32	24

Miguel Ángel de Quevedo (Retorno con SN)

INTERVALO	VUELTA EN U AL W	VUELTA EN U AL E
15 min	1	7
Horario	4	28

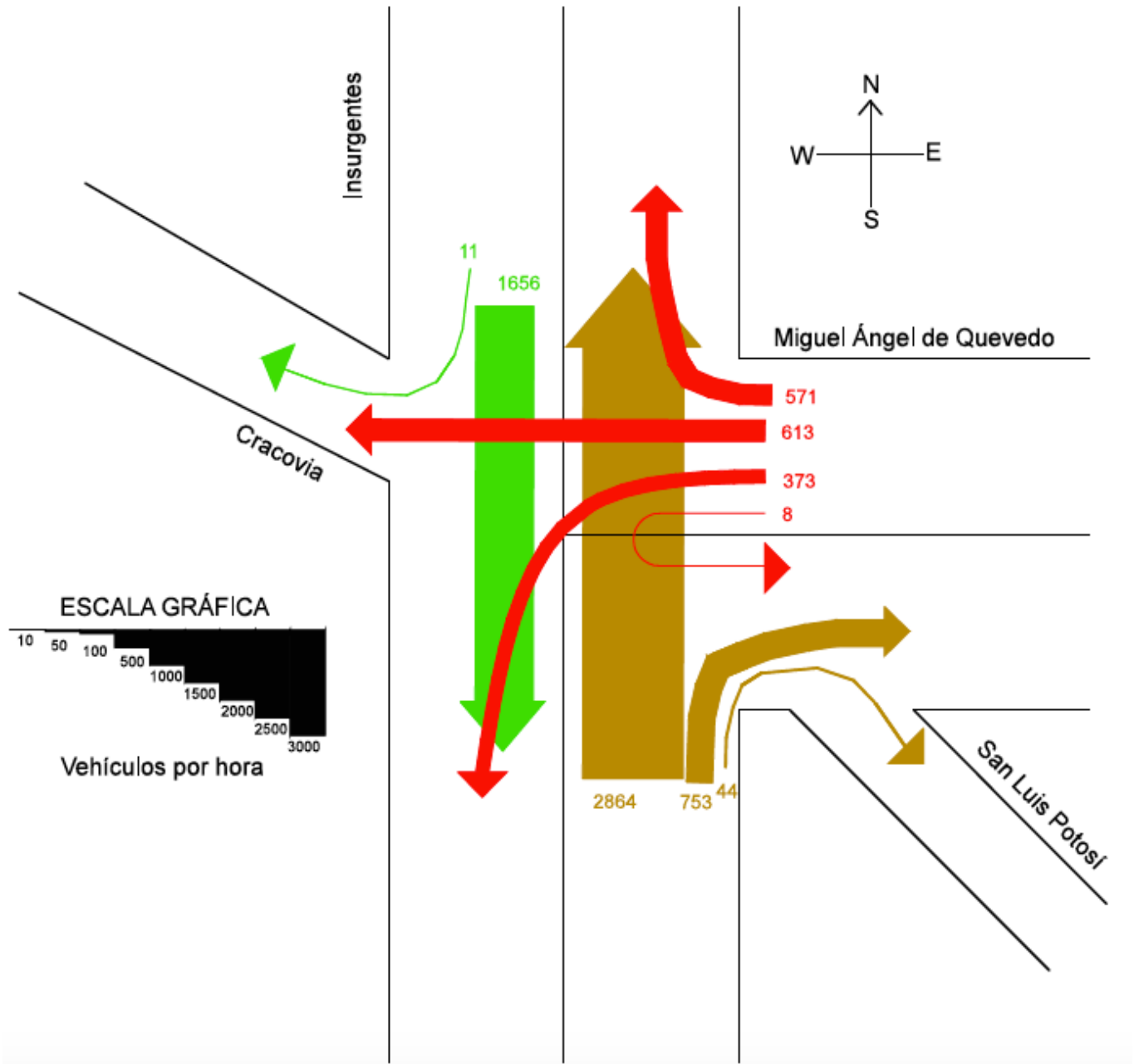
Miguel Ángel de Quevedo (Retorno con IA)

INTERVALO	VUELTA EN U AL W	VUELTA EN U AL E
15 min	3	2
Horario	12	8

ANEXO B Diagramas de Volúmenes en Hora Pico

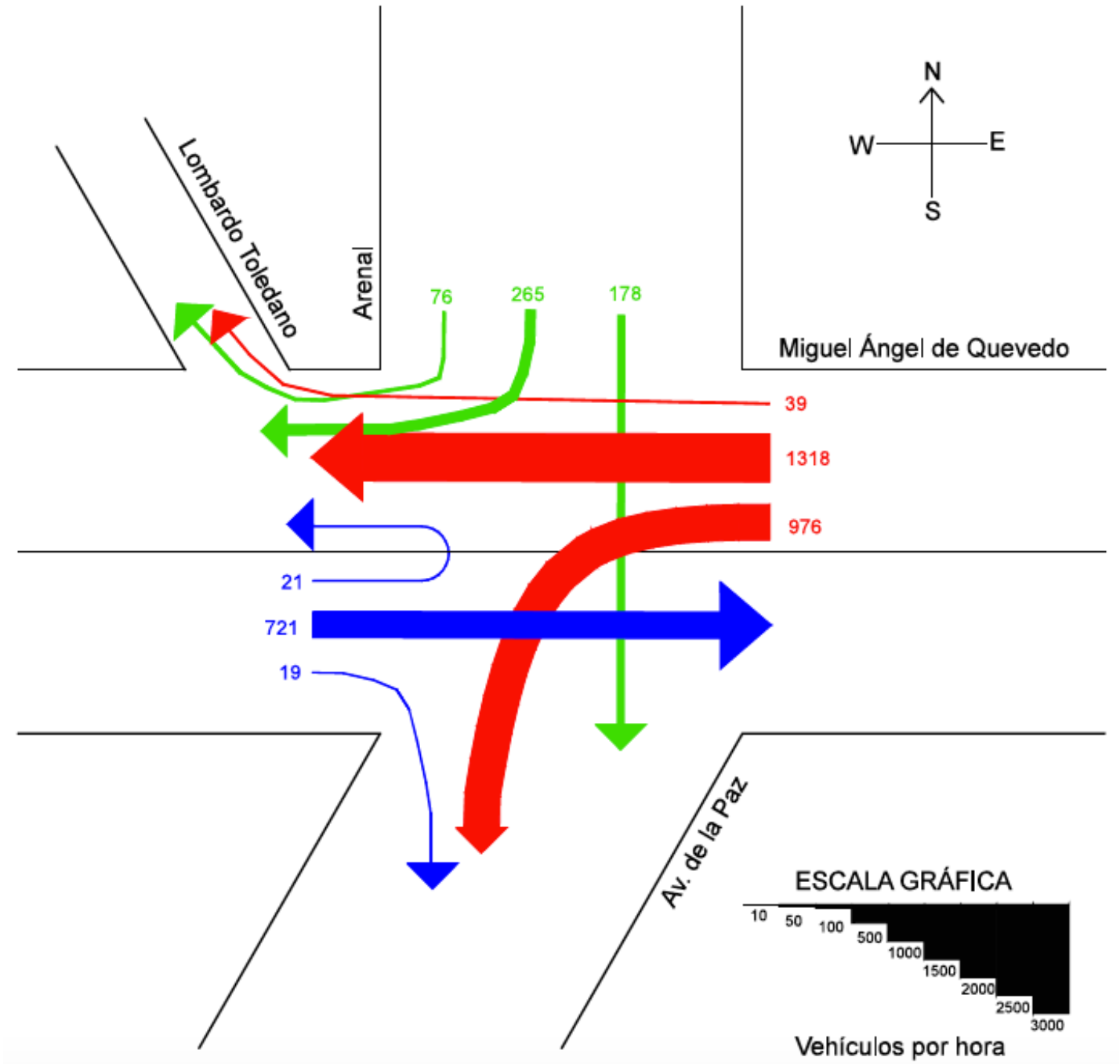
Avenida Insurgentes Sur / San Luis Potosí / Cracovia

Fuente: Elaboración Propia, 2015



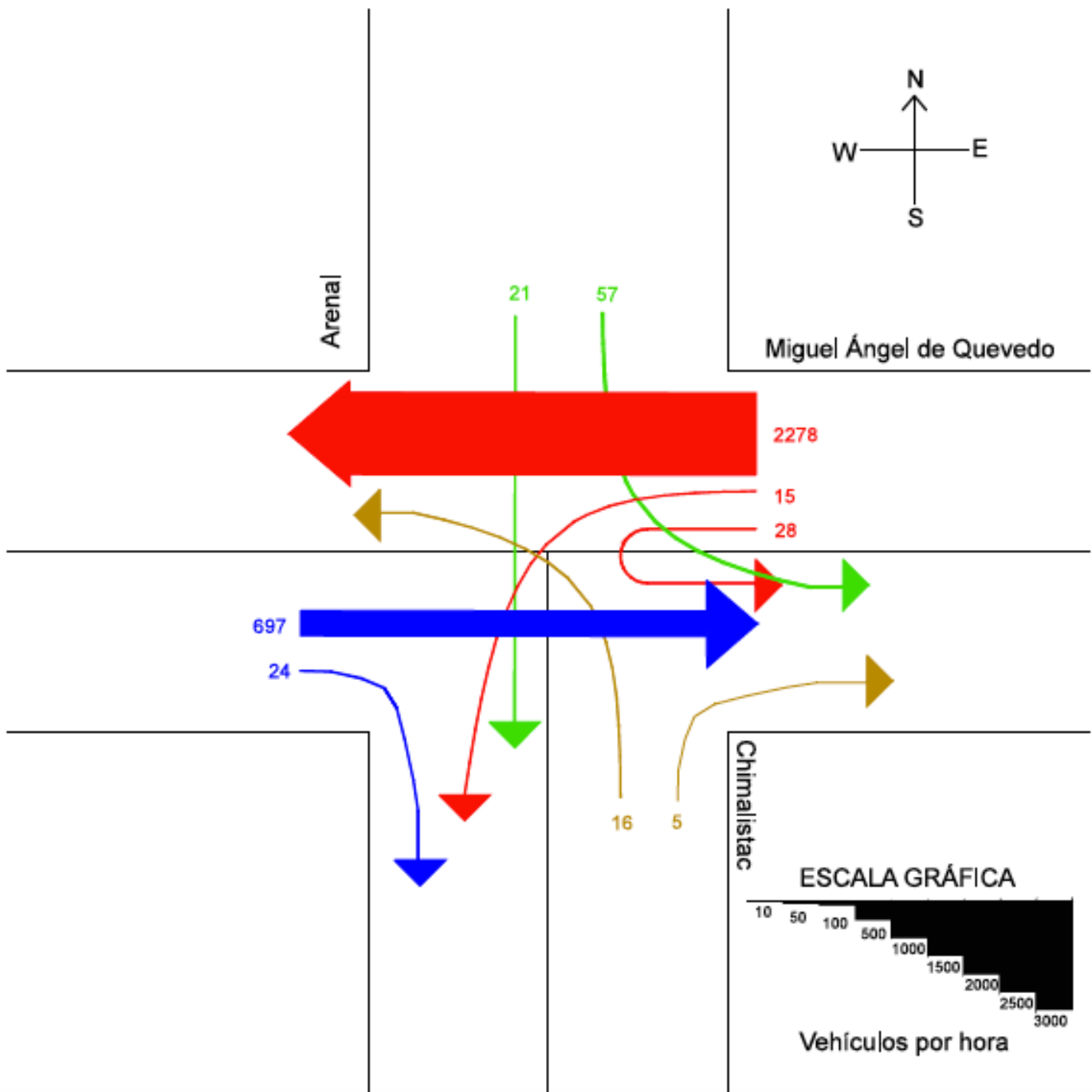
Arenal / Avenida de la Paz / Lombardo Toledano

Fuente: Elaboración Propia, 2015



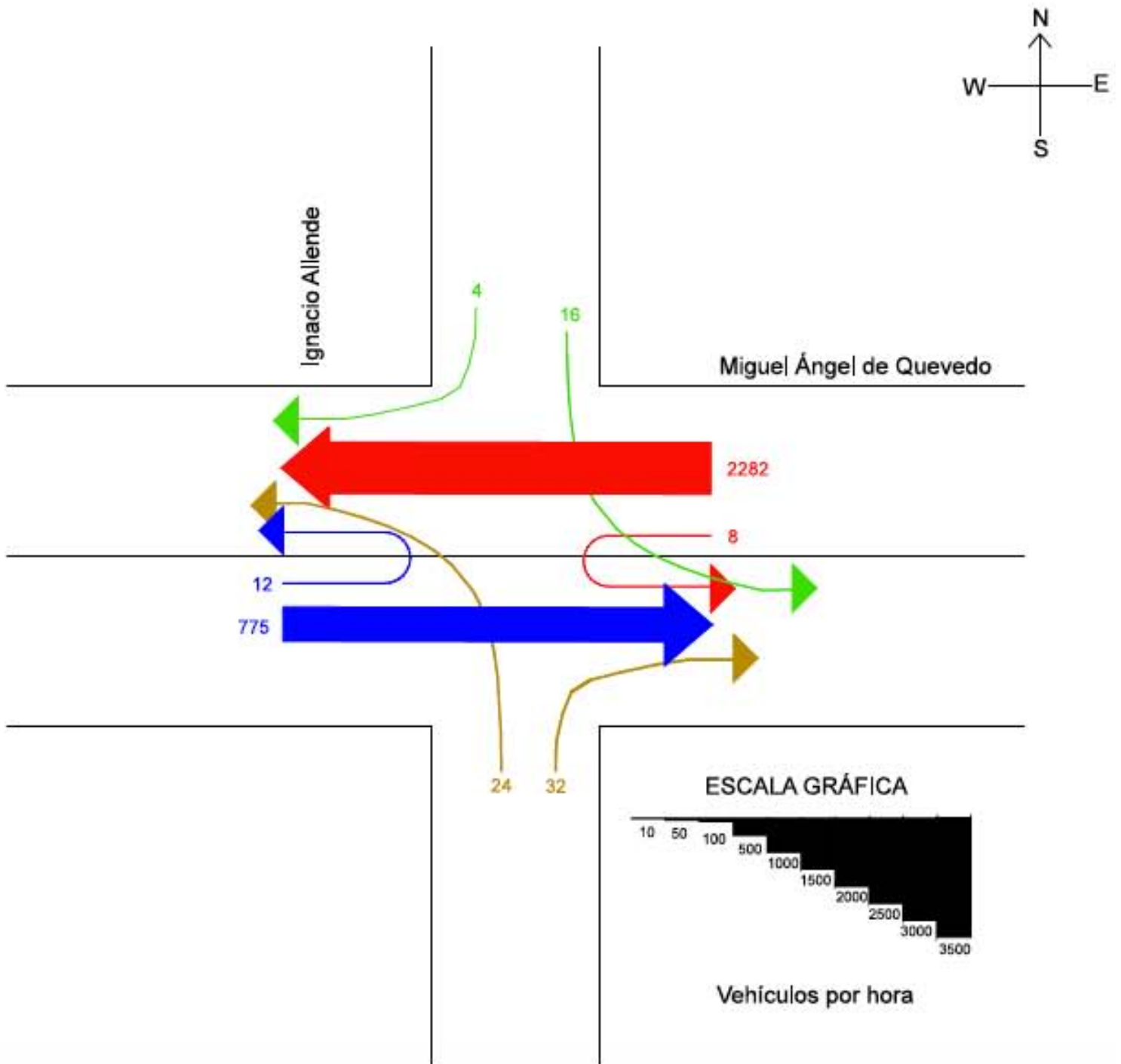
Arenal / Chimalistac

Fuente: Elaboración Propia, 2015



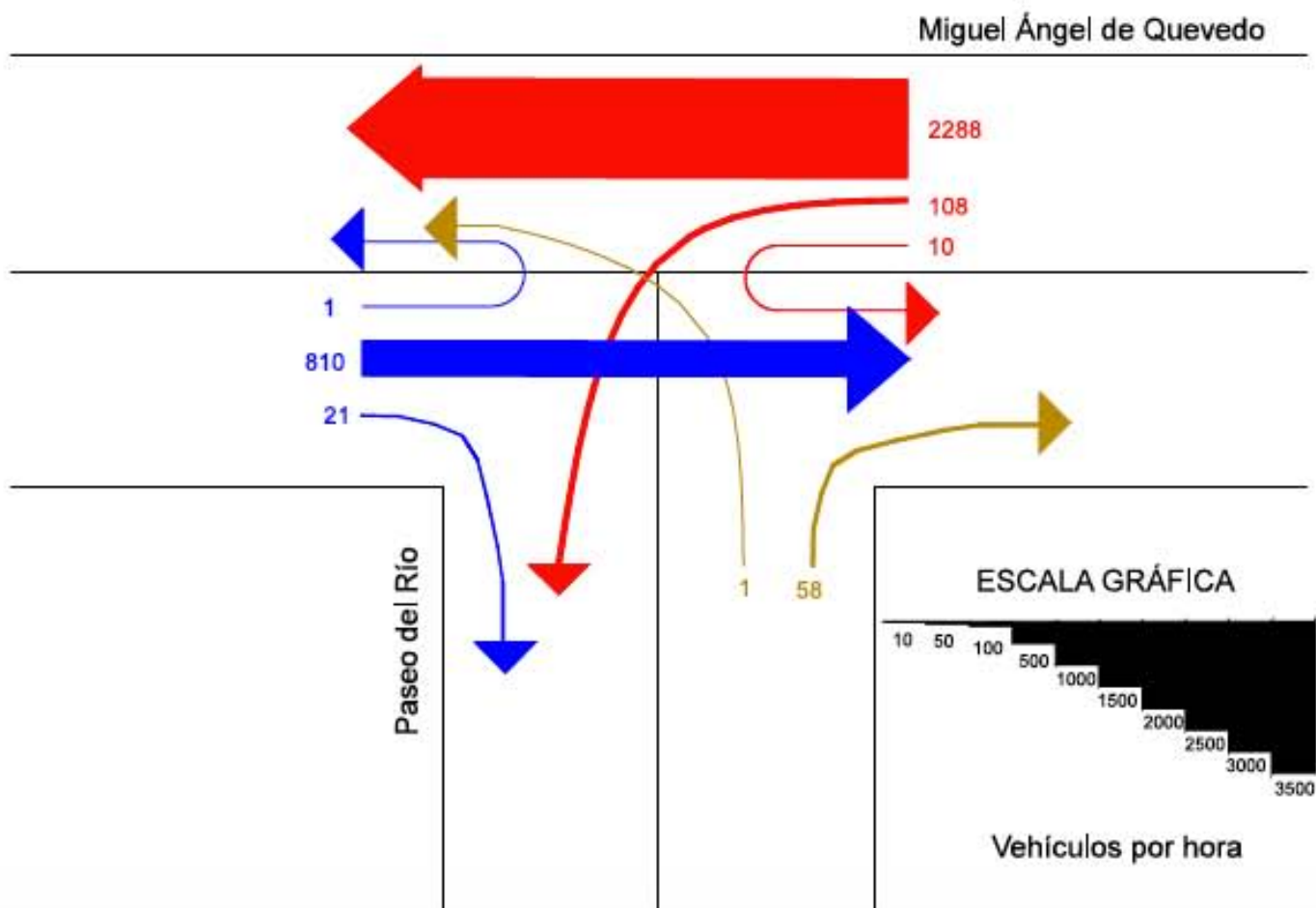
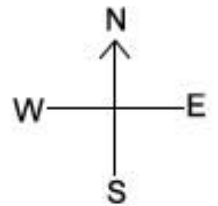
Ignacio Allende

Fuente: Elaboración Propia, 2015



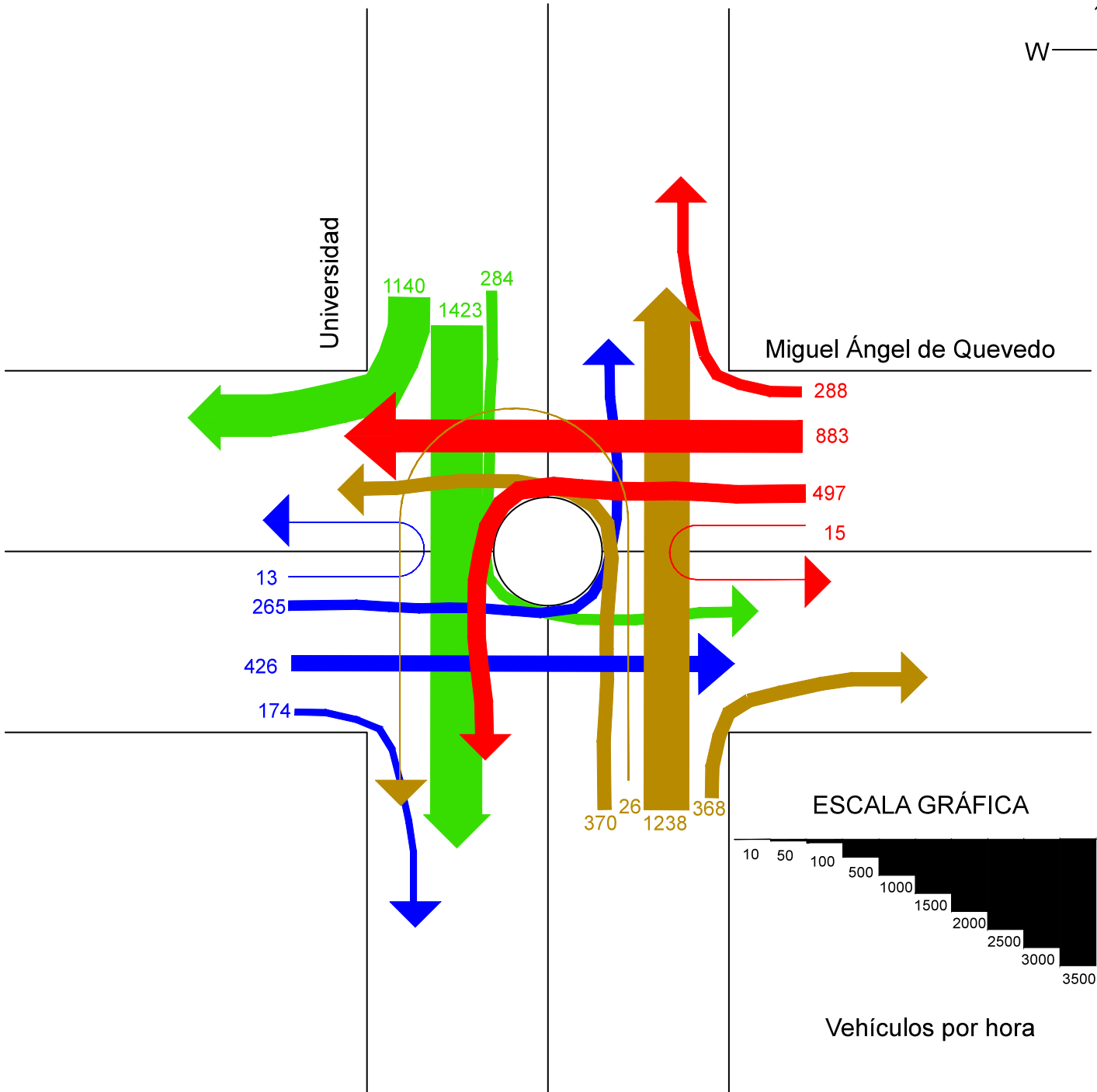
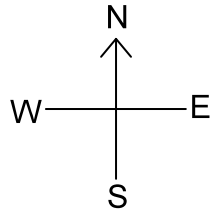
Paseo del Río

Fuente: Elaboración Propia, 2015



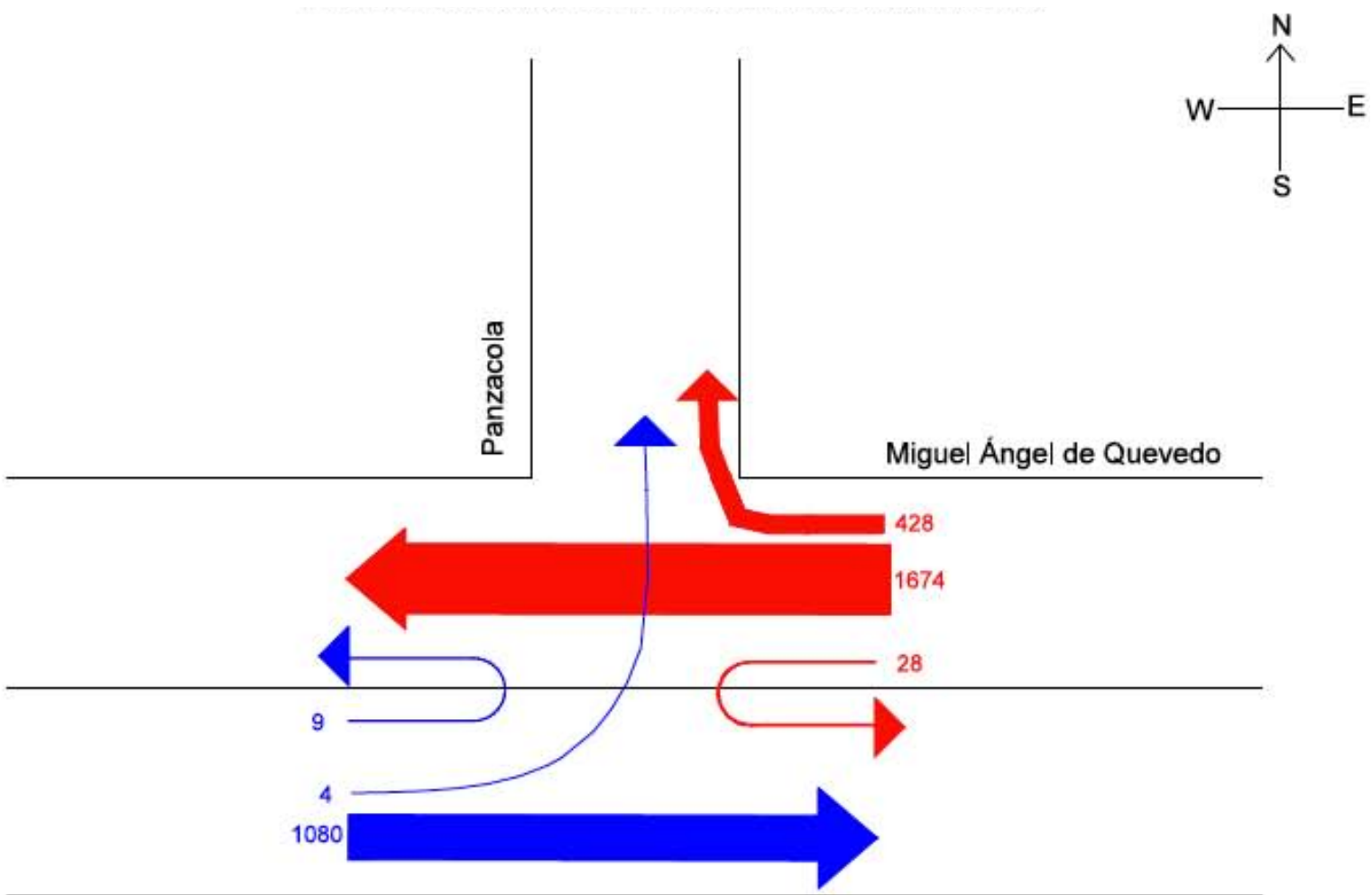
Av. Universidad

Fuente: Elaboración Propia, 2015

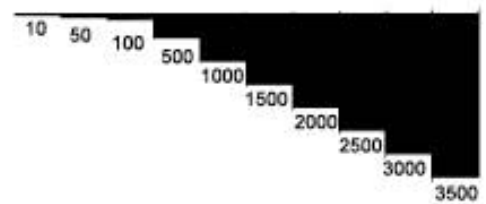


Panzacola

Fuente: Elaboración Propia, 2015



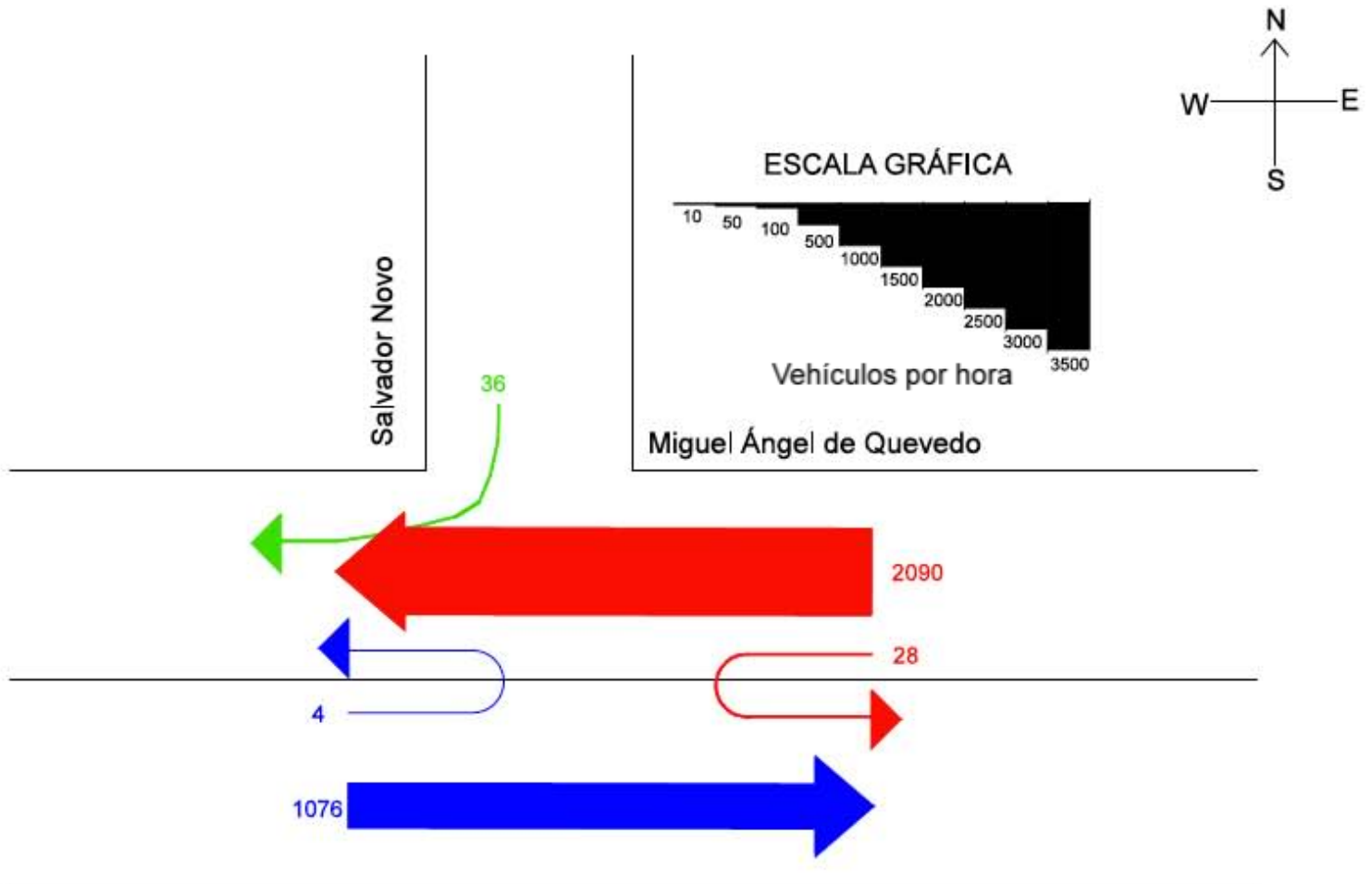
ESCALA GRÁFICA



Vehículos por hora

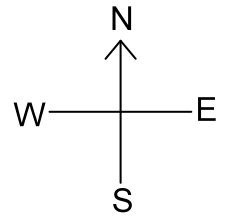
Salvador Novo

Fuente: Elaboración Propia, 2015

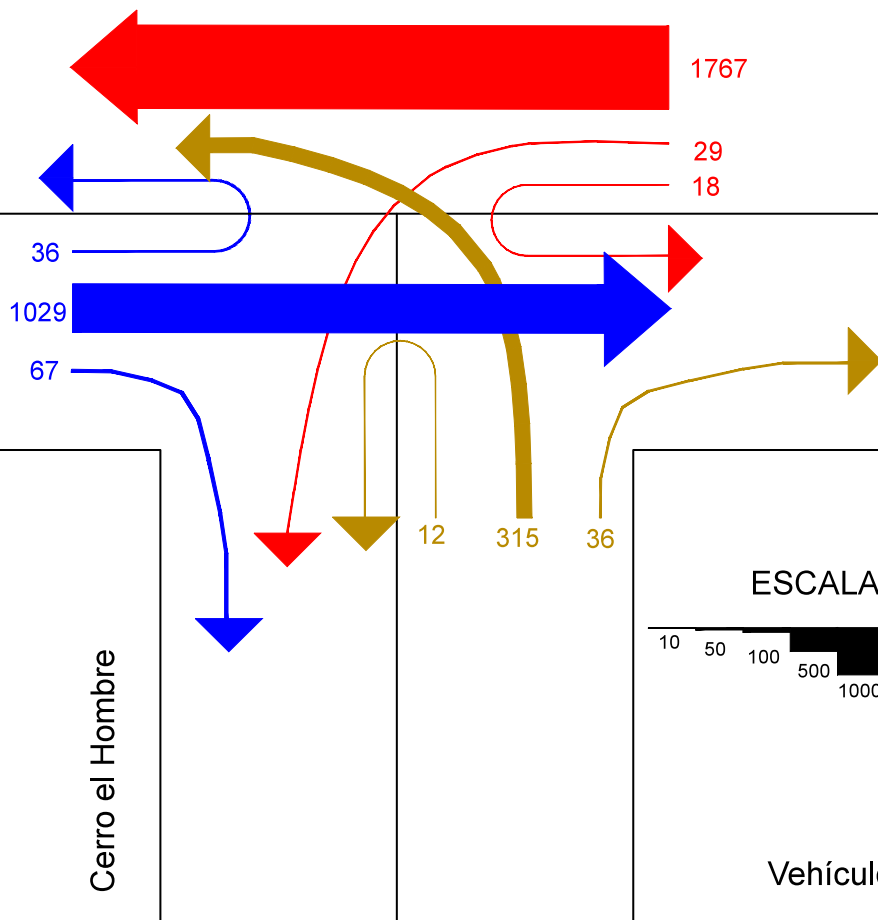


Cerro del Hombre

Fuente: Elaboración Propia, 2015

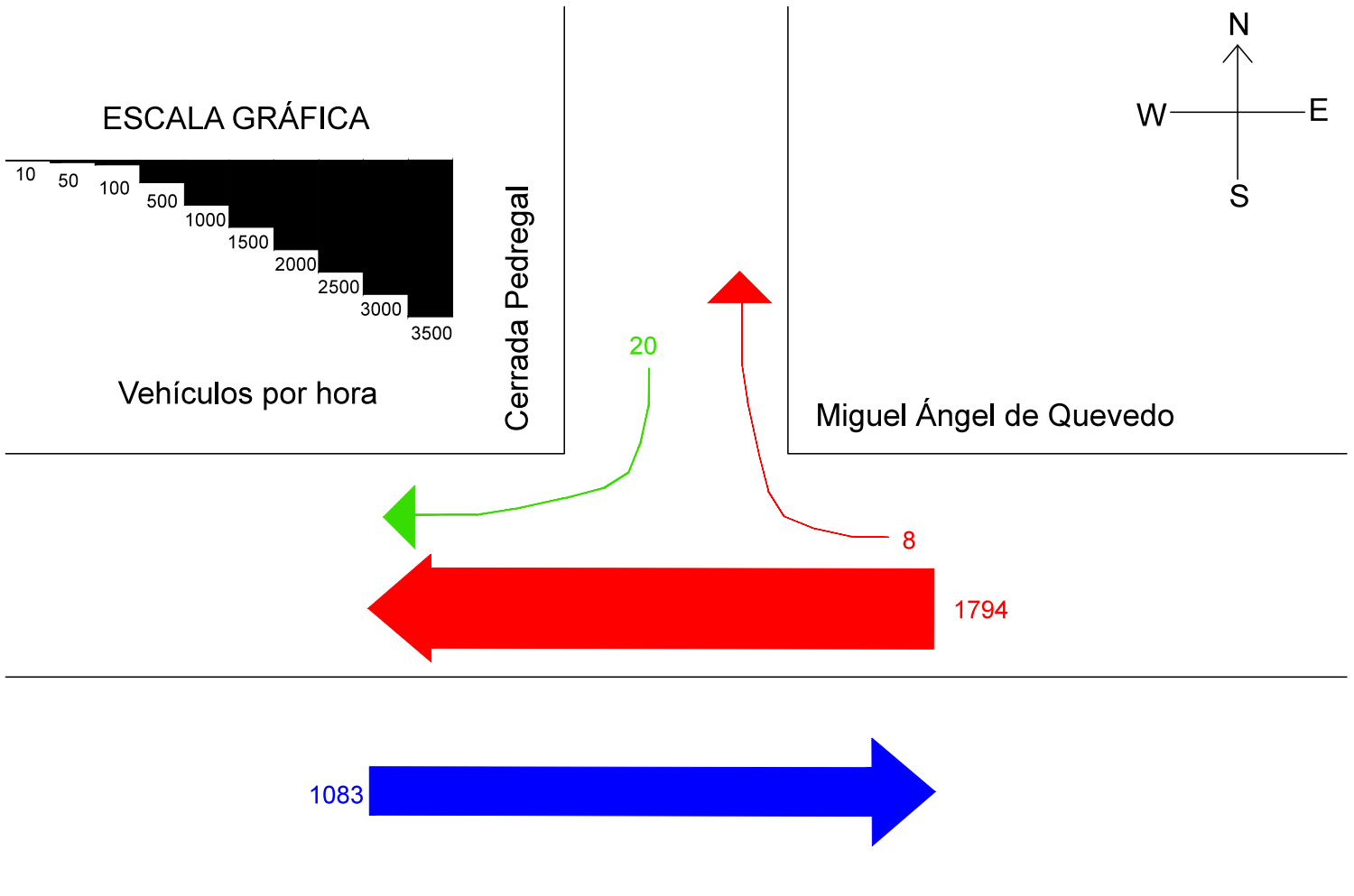


Miguel Ángel de Quevedo



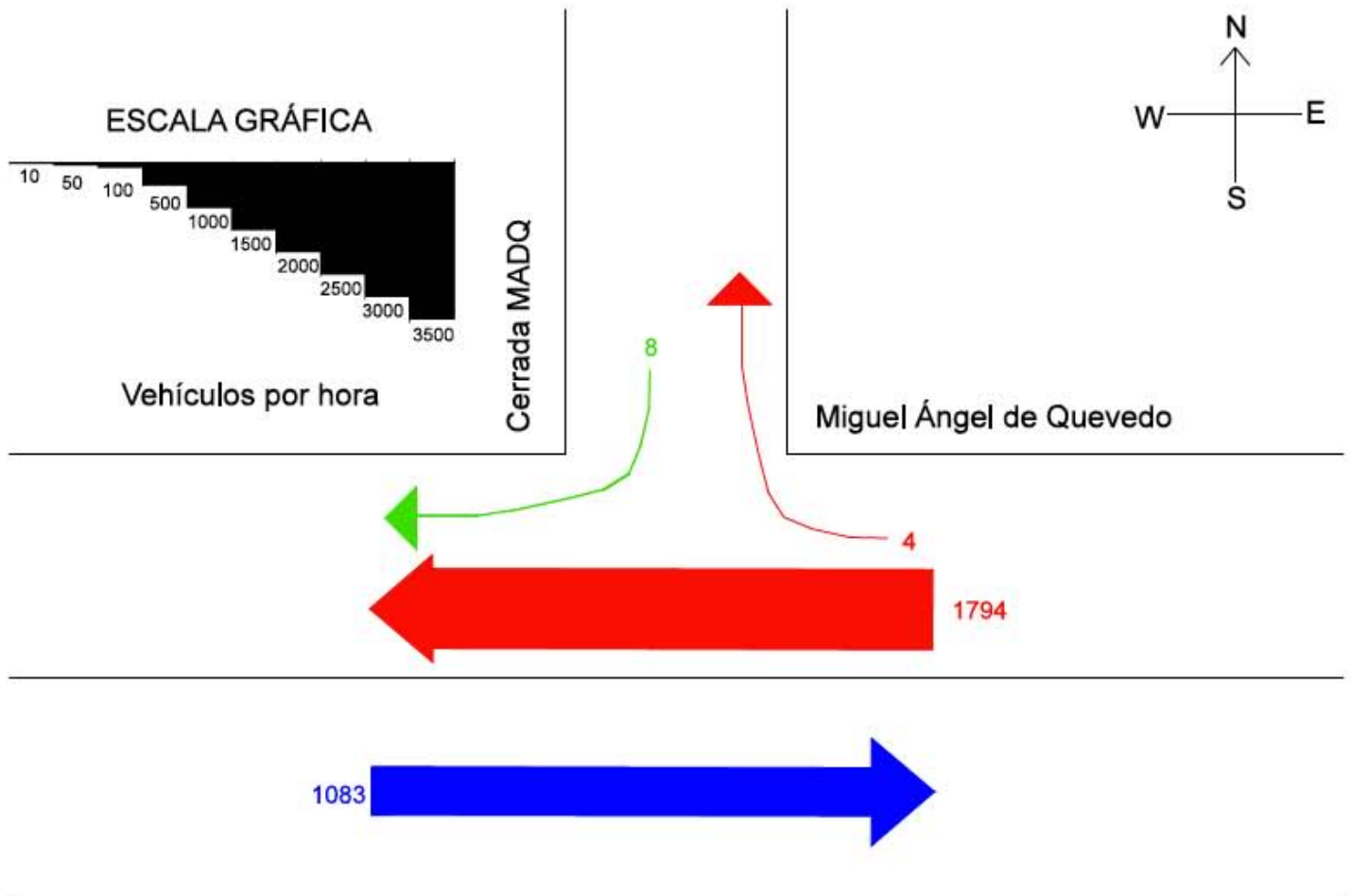
Cerrada Pedregal

Fuente: Elaboración Propia, 2015



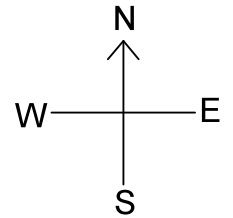
Cerrada Miguel Ángel de Quevedo

Fuente: Elaboración Propia, 2015

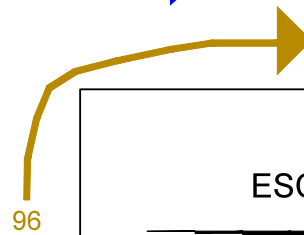


Kappa

Fuente: Elaboración Propia, 2015

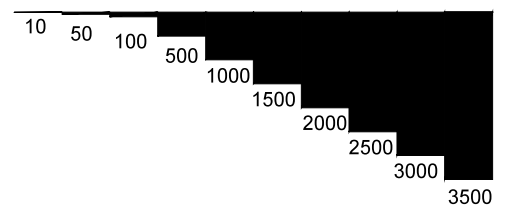


Miguel Ángel de Quevedo



Kappa

ESCALA GRÁFICA



Vehículos por hora

Ignacio Zaragoza

Fuente: Elaboración Propia, 2015

