



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

Criterios de ingeniería de tránsito para el diseño de la intersección
del bulevar a la colonia Lourdes y la Calzada de La Paz

Luis Rolando Aguilar Aldana
Asesorado por: Ing. José Leonel Aguilar Girón

Guatemala, junio de 2005

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**CRITERIOS DE INGENIERÍA DE TRÁNSITO PARA EL DISEÑO
DE LA INTERSECCIÓN DEL BULEVAR A LA COLONIA
LOURDES Y LA CALZADA DE LA PAZ**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

LUIS ROLANDO AGUILAR ALDANA

ASESORADO POR EL ING. JOSÉ LEONEL AGUILAR GIRÓN

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, JUNIO DE 2005

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado

Criterios de ingeniería de tránsito para el diseño de la intersección del bulevar a la colonia Lourdes y la Calzada de La Paz

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Ingeniería Civil con fecha 31 de enero de 2005

Luis Rolando Aguilar Aldana

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson.
VOCAL I	Ing. Murphy Olympo Paíz Recinos.
VOCAL II	Lic. Amahán Sánchez Álvarez.
VOCAL III	Ing. Juilio David Galicia Celada.
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruíz.
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva.
SECRETARIO	Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez.

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Julio Ismael González Podzuek.
EXAMINADOR	Ing. José Gabriel Ordóñez Morales.
EXAMINADOR	Ing. Sergio Waldemar Valdez Bonilla.
EXAMINADOR	Ing. Rubén Rodolfo Pérez Oliva.
SECRETARIO	Ing. Francisco Javier González López.

AGRADECIMIENTO

Al ingeniero José Leonel Aguilar Girón, por su valiosa colaboración en el asesoramiento del presente trabajo de graduación.

DEDICATORIA

A mi esposa,

mis padres,

mis hermanas,

mis abuelos (Q.E.P.D.)

Y en especial a mi tío Carlos Humberto Girón (Q.E.P.D.)

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
GLOSARIO	XV
RESUMEN	XIX
OBJETIVOS	XXI
INTRODUCCIÓN	XXIII
1. PROCESO DE PLANIFICACIÓN	1
1.1. El proceso de resolver un problema	2
1.1.1. La diferencia entre resolver un problema y la planificación	5
1.2. Proceso de planificación del transporte	7
1.2.1. Descripción general	8
1.2.2. Problemas del transporte y su ámbito	12
1.2.3. Definición de objetivos y restricciones	14
1.2.4. Modelar el sistema de transporte y su dominio	14
1.2.5. Recolección de datos	18
1.2.6. Evaluación de funcionamiento y toma de decisiones	19
1.2.7. Generación de alternativas en la solución del transporte	20
1.2.8. Especificación de detalles de solución al sistema de transporte	22
1.2.9. Ejecución del proyecto	23
1.2.10. Operación y mantenimiento	24

2.	ESTRUCTURACIÓN Y USO DE MODELOS MATEMÁTICOS PARA DESCRIBIR EL COMPORTAMIENTO DEL TRÁNSITO	27
2.1.	Definición de modelo	28
2.2.	Descripción de variables utilizadas en los modelos	28
2.3.	Conceptos generales de capacidad y nivel de servicio	34
	2.3.1. Capacidad vial	34
	2.3.2. Nivel de servicio	35
2.4.	Características de los volúmenes de tránsito	38
	2.4.1. Distribución y composición del tránsito	39
	2.4.2. Variaciones del volumen en el tiempo	40
	2.4.2.1. Variaciones del volumen en la hora de máxima demanda	40
	2.4.2.2. Variación horaria del volumen	42
	2.4.2.3. Variación a diaria	44
	2.4.3. Estimación de volumen de tránsito futuro	45
	2.4.3.1. Volumen horario de diseño	45
	2.4.3.2. Pronósticos del volumen de tránsito futuro sin un modelo	47
	2.4.3.2.1. Recolección de datos	48
	2.4.3.2.2. Establecer la tendencia del crecimiento del tránsito	49
	2.4.3.2.3. Desarrollar una proyección preliminar	50
	2.4.3.2.4. Revisar la racionalidad del pronóstico	50
	2.4.3.2.5. Desarrollar el pronóstico del tránsito futuro en detalle	51
	2.4.3.2.6. Revisión final y documentación	52

2.4.3.3.	Modelos de planificación para estimar el tránsito futuro	53
2.5.	Modelos de flujo vehicular	54
2.5.1.	Criterios de análisis de capacidad y niveles de servicio	56
2.5.2.	Semáforos	57
2.5.3.	Análisis de capacidad y nivel de servicio en intersecciones con semáforo	61
2.5.4.	Metodología del análisis operacional de intersecciones con semáforo	67
2.5.4.1.	Módulo de entrada	67
2.5.4.2.	Módulo de ajuste de volúmenes	72
2.5.4.3.	Módulo tasa de flujo de saturación	74
2.5.4.3.1.	Ajuste por ancho de carril	75
2.5.4.3.2.	Ajuste por vehículos pesados	76
2.5.4.3.3.	Ajuste por pendiente del acceso	76
2.5.4.3.4.	Ajuste por parqueo	77
2.5.4.3.5.	Ajuste por bloqueo de buses	78
2.5.4.3.6.	Ajuste por tipo de área	78
2.5.4.3.7.	Ajuste por utilización de carril	79
2.5.4.3.8.	Factor de ajuste vuelta a la derecha	80
2.5.4.3.9.	Ajuste para cruces a la izquierda	81
2.5.4.3.10.	Factores de ajuste por bloqueo de peatones o bicicletas	82
2.5.4.4.	Módulo de análisis de capacidad	83
2.5.4.5.	Módulo de nivel de servicio	86
2.5.4.6.	Módulo extensión de colas	99
2.5.4.7.	Interpretación de resultados	106
2.5.4.8.	Otros análisis	108

2.5.5.	Modelos de simulación de tránsito y criterios para selección de programas de computadora	108
2.5.6.	Modelos de aceleración y frenado	111
2.5.7.	Modelos de costos de operación vehicular, consumo de combustibles y emisión de poluciones	115
3.	RECOLECCIÓN DE DATOS	129
3.1.	Aforo de volúmenes de tránsito	129
3.2.	Medición directa de demora en intersecciones con semáforo	131
3.2.1.	Método del semáforo	131
3.2.2.	Método del vehículo de prueba	132
3.3.	Medición del flujo de saturación en campo	135
4.	EJEMPLO DE APLICACIÓN	
	ESTUDIO DEL MOVIMIENTO DE TRÁNSITO EN LA INTERSECCIÓN DEL BULEVAR LOURDES Y LA CALZADA DE LA PAZ	139
4.1.	Antecedentes del proyecto	140
4.1.1.	Condiciones físicas y ubicación del proyecto	140
4.1.2.	Características geológicas	140
4.1.3.	Reseña histórica	141
4.1.4.	Uso del suelo	141
4.1.5.	Modos de viaje	142
4.2.	Definición del problema	143
4.3.	Identificación de objetivos	144
4.4.	Recolección de datos	145
4.4.1.	Geometría de la intersección	145
4.4.2.	Sucesión de fases y tiempos del semáforo	146
4.4.3.	Aforo de volúmenes de tránsito	148
4.5.	Modelo del comportamiento del tránsito	165
4.5.1.	Ingreso de datos	165

4.5.2.	Módulo ajuste de volúmenes	168
4.5.3.	Módulo flujo de saturación	169
4.5.4.	Análisis de capacidad	173
4.5.5.	Efecto de una cola inicial	176
4.5.6.	Modulo de nivel de servicio	179
4.5.7.	Modulo extensión de colas	183
4.6.	Evaluación del funcionamiento de la intersección	189
5.	CRITERIOS PARA DEFINIR OPCIONES DE DISEÑO	191
5.1.	Descripción de opciones de diseño y análisis comparativo	191
5.1.1.	Regular el tránsito por medio de semáforo	191
5.1.2.	Ampliación de las vías terrestres	191
5.1.3.	Plantear solución mediante pasos a nivel	192
5.1.4.	Distribución de tránsito a desnivel	195
5.1.4.1.	Pasos a desnivel	195
5.1.4.2.	Tipos de intersección	196
5.1.4.2.1.	Diamante	197
5.1.4.2.2.	Intersección urbana de un solo punto	199
5.1.4.2.3.	Intersección tipo trompeta	201
5.1.4.2.4.	Tréboles completos	202
5.1.4.2.5.	Trébol parcial	204
5.1.4.2.6.	Intersecciones direccionales	205
5.1.4.3.	Selección del tipo de intersección	207
5.1.4.3.1.	Disponibilidad del derecho de vía	207
5.1.4.3.2.	Costos de construcción	208
5.1.4.3.3.	Criterios de operación vehicular	208
5.2.	Propuestas de intersección	211
5.2.1.	Viaducto zona 5 – Calzada de La Paz	211
5.2.2.	Trébol parcial de dos hojas	214

5.2.3. Trébol completo	216
5.3. Criterios para selección final	218
CONCLUSIONES	221
RECOMENDACIONES	223
BIBLIOGRAFÍA	225
APÉNDICE	227

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FÍGURAS

1	Solución de problemas	3
2	Planificación del transporte	8
3	Fases de la etapa V del proceso de planificación del transporte	16
4	Variación del volumen en la hora pico	42
5	Variación horaria del volumen	43
6	Variación diaria del volumen	44
7	Relaciones entre volúmenes horarios más altos del año y TPDA	46
8	Caso III Demora por cola inicial con su despeje durante T	93
9	Caso IV Demora por cola inicial con demanda que disminuye durante T	94
10	Caso V Demora por cola inicial con incremento de demanda en T	95
11	Extensión de colas	100
12	Modelo de aceleración y frenado	112
13	Croquis geometría actual	146
14	Formulario de encuesta conteo direccional clasificado	149
15	Volúmenes de tránsito originados en la colonia Lourdes	157
16	Volúmenes de tránsito originados en la zona 5	158
17	Volúmenes de tránsito originados en Calzada de La Paz	159
18	Volúmenes de tránsito originados en el colegio Austriaco	160
19	Composición del tránsito originado en la colonia Lourdes	161
20	Composición del tránsito originado en la zona 5	162

21	Composición del tránsito originado en la Calzada de La Paz	163
22	Composición del tránsito originado en el colegio Austriaco	164
23	Hoja de ingreso de datos	166
24	Hoja de cálculo de ajuste de volúmenes y tasa de flujo de saturación	172
25	Hoja de cálculo cola inicial	178
26	Hoja de cálculo capacidad y nivel de servicio	182
27	Hoja de cálculo extensión de colas parte (1/2)	188
28	Hoja de cálculo extensión de colas parte (2/2)	189
29	Geometría de una rotonda con cuatro accesos	194
30	Intersección tipo diamante	198
31	Intersección urbana de un solo punto	200
32	Intersección tipo trompeta	202
33	Trébol completo	203
34	Trébol parcial de dos pétalos	205
35	Intersección completamente direccional	206
36	Selección preliminar de un paso a desnivel en la intersección de dos vías principales	210
37	Propuesta N° 1 Viaducto zona 5 – Calzada de La Paz	213
38	Propuesta N° 2 Trébol parcial de dos hojas	215
39	Propuesta N° 3 Trébol completo	217
40	Hoja ingreso de datos	229
41	Hoja de extensión de colas (Parte 1/2)	231
42	Hoja de extensión de colas (Parte 2/2)	233
43	Hoja de cálculo de ajuste de volúmenes y tasa de flujo de saturación	235
44	Hoja de cálculo capacidad y nivel de servicio	237
45	Hoja de cálculo cola inicial	239

TABLAS

I	Niveles de servicio en intersecciones con semáforo	66
II	Tipo de llegada correspondiente a la relación de grupo	70
III	Valores variables en condiciones ideales	72
IV	Valores del factor de progresión según la relación g/C y el tipo de llegada	88
V	Selección de las variables de demora según el tipo de escenario	98
VI	Parámetros para valores percentiles de extensión de colas para semáforos de tiempo fijo	103
VII	Parámetros para modelos de consumo de combustibles y emisiones	117
VIII	Datos representativos para vehículos livianos y pesados	118
IX	Datos representativos para vehículos livianos y pesados	119
X	Parámetros de modelo de costos aplicados a Guatemala	120
XI	Volúmenes de tránsito con origen en la colonia Lourdes	151
XII	Volúmenes de tránsito con origen en la zona 5	152
XIII	Volúmenes de tránsito con origen Calzada de La Paz	153
XIV	Volúmenes de tránsito con origen en el colegio Austriaco	154
XV	Clasificación por movimientos	155
XVI	Clasificación de movimientos en hora pico matutina	155
XVII	Clasificación de movimientos en hora pico vespertina	156
XVIII	Distribución del tránsito por origen	156
XIX	Sucesión de fases del semáforo	167

LISTA DE SÍMBOLOS

C	duración del ciclo (seg).
EL	número de vehículos que seguiría recto de no existir cruces a la izquierda en el movimiento opuesto.
f_A	factor de ajuste por ancho de carril.
f_B	factor de ajuste por paradas de autobuses.
f_E	factor de ajuste por estacionamiento.
FHP	factor de hora pico.
F_I	factor de ajuste por ubicación de la intersección.
f_p	factor de ajuste por pendiente de acceso.
f_s	factor de ajuste saturación del cruce a la izquierda.
f_{VD}	factor de ajuste por vueltas a la derecha en el grupo de carriles.
f_{VI}	factor de ajuste por vueltas a la izquierda en el grupo de carriles.
f_{VP}	factor de ajuste por vehículos pesados.
g	tiempo de verde efectivo (seg).
gq	porción de la fase verde que se encuentra bloqueada para el giro a la izquierda, durante el tiempo que tarda en disiparse la cola del movimiento opuesto.
gu	parte del verde que no tiene obstáculos.
gf	lapso inicial de la fase verde, durante el cual, los vehículos que siguen de frente pueden moverse libremente hasta que llega el primer vehículo que desea dar vuelta a la izquierda.
L	tiempo perdido en cambios de intervalo.
N	número de carriles en el grupo de carriles o en el acceso.

No	número de los principales carriles que se oponen a un cruce permitido a la izquierda.
PCV	porcentaje de ciclo que es verde en el movimiento.
Pvio	proporción de cruces a la izquierda del flujo opuesto.
PL	proporción de vehículos a la izquierda sobre un carril compartido.
P_t	proporción de vehículos que siguen recto sobre el carril compartido.
PVG	porcentaje de todos los vehículos en el movimiento que llegan durante la fase verde.
P_{vi}	proporción de vehículos que se mueven por el grupo de carriles y dan vuelta a la izquierda.
rg	relación de grupos.
s	flujo de saturación del grupo de carriles, expresado como el total para todos los carriles del grupo, en condiciones predominantes (vhp).
so	flujo de saturación ideal (vehículos por hora de verde de carril).
Sop	tasa de flujo de saturación del acceso opuesto (vphv).
U	factor de utilización del carril.
vhp	vehículos por hora.
vphvpc	vehículos por hora de luz verde por carril.
V	tasa de flujo (vehículos por hora).
Va	tasa de flujo total del acceso en estudio (vph).
vi	flujo de demanda ajustado en el grupo de carriles (VPH).
Vm	tasa de flujo principal, es la tasa de flujo del acceso menos las vueltas a la izquierda que se verifican en carriles de uso exclusivo o en accesos de un solo carril.
Vo	tasa de flujo del movimiento opuesto.
Vp	tasa de flujo durante los 15 minutos de máxima demanda.

Vvi	tasa de flujo de vuelta a la izquierda (vph).
Y	cambio de intervalo.
Yo	tasa de flujo del acceso opuesto (vph).
PCV	porcentaje del ciclo que es verde en el movimiento.
PVG	porcentaje de todos los vehículos en el movimiento que llegan durante la fase verde.

GLOSARIO

Cambio de intervalo	Son los intervalos amarillo y todo rojo que ocurren entre fases para proveer el despeje de la intersección antes que sucedan movimientos conflictivos.
Capacidad	Es el número de vehículos que pueden pasar por un punto o sección uniforme de un carril o una calzada durante un intervalo de tiempo dado, en las condiciones predominantes de la infraestructura vial, del tránsito y de los dispositivos de control.
Ciclo	Es cualquier secuencia completa de las indicaciones del semáforo.
Conteo de tránsito clasificado	Procedimiento por medio del cual se obtienen datos del número de vehículos que pasan por una vía terrestre y su composición, de manera que se distingan los diferentes tipos de vehículos.
Densidad vehicular	Es el número de vehículos que ocupa una longitud específica de una vía en un momento dado.
Distancia de visibilidad de parada	Es la distancia mínima que requiere un conductor que se mueve en un vehículo a la velocidad de diseño, para detener su marcha sin peligro de colisión.

Fase	<p>Parte del ciclo asignada a cualquier combinación de uno o más movimientos que recibe simultáneamente el derecho de paso, durante uno o más intervalos. Es la selección y ordenamiento de movimientos simultáneos. Una fase puede significar un solo movimiento vehicular, un solo movimiento peatonal, o una combinación de movimientos vehiculares y peatonales.</p> <p>Una fase comienza con la pérdida del derecho de paso de los movimientos que entran en conflicto con los que lo ganan.</p> <p>Un movimiento pierde el derecho de paso en el momento de aparecer la indicación amarilla.</p>
Flujo de saturación	<p>Es la máxima tasa de flujo, en un acceso o en un grupo de carriles, que pueden atravesar una intersección en las condiciones prevalecientes del tránsito, en el supuesto que dicho acceso o grupo de carriles tiene el 100% del tiempo disponible como verde efectivo.</p>
Hora pico	<p>Es la hora del día que presenta la mayor demanda de circulación.</p>
Intersección	<p>Se denomina así al entrecruzamiento de dos o más vías terrestres.</p>
Intervalo	<p>Cualquiera de las divisiones del ciclo, durante la cual no cambian las indicaciones del semáforo.</p>
Longitud de ciclo	<p>Es el tiempo necesario para una secuencia completa de todas las indicaciones de señal del semáforo, se expresa en</p>

segundos y se representa por el símbolo C.

Movimiento	Maniobra o conjunto de ellas de un mismo acceso que tiene el derecho de paso simultáneamente y forma una misma fila.
Nivel de servicio	Es una medida cualitativa que describe las condiciones de operación de un flujo vehicular, y de su percepción por los usuarios de una vía.
Relación de verde	Es la relación entre el verde efectivo y el ciclo.
Rojo efectivo	Tiempo durante el cual un movimiento o una serie de movimientos no son permitidos, se estima como la longitud del ciclo menos el tiempo de verde efectivo .
Tiempo de verde	Es el tiempo dentro de una fase durante el cual se muestra la indicación de luz verde.
Tiempo perdido	Tiempo durante el cual la intersección no es utilizada en forma efectiva por ningún movimiento. Estos tiempos ocurren durante el cambio de intervalo (cuando la intersección es despejada), y al principio de cada fase donde los primeros vehículos formados en la cola experimentan demoras por inicio de marcha.
Tiempo de verde efectivo	Es el tiempo dentro de una fase dada, que es efectivamente disponible para los movimientos permitidos. Generalmente se toma como el tiempo de verde más el cambio de intervalo

menos el tiempo perdido de la fase que se está analizando.

Tránsito promedio diario anual Es el número total de vehículos que pasan durante un año por un punto dado de una vía, dividido entre 365.

Velocidad Es la relación entre espacio recorrido y tiempo.

Volumen de tránsito Es el número de vehículos que pasa por un punto o una sección de una calzada o una calle en un período determinado. También se le denomina flujo o tasa de flujo.

RESUMEN

Este trabajo de graduación tiene como misión contribuir a la solución de los problemas de tránsito que se viven a diario en la ciudad de Guatemala mediante la aplicación de procedimientos efectuados en países desarrollados.

Como primera instancia, se plantea el marco teórico de la planificación del transporte, éste es el punto de partida para iniciar cualquier esfuerzo con el fin de obtener soluciones racionales y evitar la improvisación.

La mayor parte de los conflictos viales se producen en las intersecciones y su análisis se hace a través del estudio de modelos matemáticos para cuantificar el comportamiento del tránsito y evaluar el funcionamiento de las vías existentes.

Para la aplicación de estos modelos matemáticos es necesaria la recolección de datos tales como el volumen de tránsito y la demora, para lo cual existen algunos procedimientos que recaban esta información. En particular, se aplicarán los métodos estudiados en un caso de ejemplo, la intersección entre la Calzada de La Paz y el bulevar a la colonia Lourdes, ésta última situada en una zona de influencia de alto crecimiento de población y que, actualmente, regula los movimientos de los vehículos por medio de un semáforo.

En el caso que este tipo de control sea insuficiente para regular el tránsito, se propondrán algunas soluciones posibles en las que se observan las ventajas y desventajas de cada una, para decidir entre ellas la que se considere la solución óptima.

OBJETIVOS

General

Describir los criterios de ingeniería de tránsito para el diseño de la intersección del bulevar a la Colonia Lourdes y la Calzada de La Paz.

Específicos

1. Describir la planificación del transporte para que se utilice como guía del proceso de diseño de manera que se encuentren las mejores soluciones de una forma más precisa.
2. Actualizar el conocimiento del material bibliográfico existente, en lo referente a los modelos matemáticos que se utilizan para describir el comportamiento del tránsito, la formulación de proyecciones a mediano y largo plazo, los criterios de análisis de capacidad y niveles de servicio y la interpretación de resultados.
3. Describir los procedimientos de recolección de datos para realizar muestreos estadísticos de los vehículos que transitan en la intersección del bulevar a la colonia Lourdes y la Calzada de La Paz, como base para el predimensionamiento de las vías y las estructuras en su caso.
4. Determinar la capacidad vial y niveles de servicio de la intersección antes mencionada y de cada uno de sus accesos.

5. Proponer soluciones que mejoren la circulación de vehículos en el cruce de vías anteriormente mencionado.

INTRODUCCIÓN

Cada año se incrementa el número de vehículos automotores que circulan en la ciudad de Guatemala, cuyo desarrollo urbano es desordenado y sin planificación, hay carencia de rutas alternas, por lo que las vías existentes se saturan por los elevados volúmenes de tránsito y, por consiguiente, se forman congestionamientos que causan la incomodidad de los usuarios, demoras en los tiempos de viaje, accidentes y se incrementan considerablemente los costos de transporte.

Las autoridades han hecho algunos esfuerzos para solucionar los problemas del tránsito urbano, pero es evidente que la falta de información y la falta de recursos han sido una limitante para formular proyectos eficientes.

Para el manejo de estas situaciones se cuenta con la herramienta de la ingeniería de tránsito que, a través de sus metodologías, brinda una mejor comprensión de las situaciones reales para evitar la acostumbrada prueba y error que es constantemente aplicada en el medio y que ha ocasionado, en algunos casos, inversiones que resultan ineficientes.

El presente trabajo de graduación pretende contribuir a la solución de algunos problemas de tránsito en la ciudad de Guatemala a través de la aplicación de los métodos de análisis de capacidad y nivel de servicio descritos en el Manual de capacidad de carreteras.

Específicamente, se desarrollará un ejemplo de la aplicación de los análisis anteriormente mencionados aplicados a la intersección del bulevar a la colonia Lourdes y la Calzada de La Paz, la cual regula los movimientos vehiculares por medio de un semáforo. Este tipo de control en algunos casos es insuficiente para manejar altos volúmenes de tránsito y la única manera de mejorar la capacidad de las intersecciones es a través de cambios en su geometría.

Los estudios de tránsito sirven de base para realizar el predimensionamiento de intersecciones de vías y sus correspondientes estructuras de manera que los diseños geométricos, estructurales y de pavimentos sean coherentes con la cantidad esperada de vehículos al final del período de diseño.

En el medio guatemalteco existen muchas limitaciones para realizar estudios de tránsito de cada proyecto, pero se concluye que los mismos son indispensables para aprovechar las inversiones requeridas para mitigar los problemas de tránsito, mediante el planteo de diferentes soluciones, el análisis y evaluación de las mismas y la selección de las más eficientes; tanto desde el punto de vista operativo como desde el aspecto económico.

A su vez, las consideraciones ambientales de los proyectos viales cobran mayor importancia no solamente por la contaminación por las emisiones de los vehículos y el ruido, sino por la importancia económica para el país.

1. PLANIFICACION DEL TRANSPORTE

En el medio guatemalteco existen numerosos casos en que los esfuerzos para resolver problemas de tránsito ofrecen soluciones que son llevadas a la realidad, pero éstas tienden a ser puntuales, es decir, que no resuelven la situación general. Muchas de estas soluciones son improvisadas, lo que trae como consecuencia que las inversiones económicas resulten ineficientes.

Para evitar que las soluciones de los problemas de ingeniería sean improvisadas, se debe contar con un procedimiento que coordine los trabajos por obtener la mejor solución posible dentro de las limitaciones del proyecto.

Se entiende por planificación del transporte a todas aquellas medidas a largo plazo que se toman para poder resolver la problemática del tránsito de una región, sin embargo, sus soluciones son de tipo global. La solución de problemas implica situaciones particulares que pueden ser resueltas con mayor detalle a corto, mediano y largo plazo.

Resolver problemas es uno de los aspectos más interesantes en el ejercicio profesional del ingeniero quien, a pesar de contar con herramientas matemáticas y científicas, es llamado a ejecutar esta tarea altamente artística.

Muchos analistas pueden estar de acuerdo con aceptar un método determinado de análisis, que puede ser confiable y consistente en forma lógica, aún así muy pocos coincidirán en el tiempo y lugar en que el método debe ser

usado, o en el criterio necesitado para derivar una solución adecuada a un problema.

La dificultad de tomar este tipo de decisiones está estrechamente ligada al proceso de resolver problemas, que es el procedimiento por medio del cual el ingeniero comienza con la definición del problema y termina con una solución específica que puede ser ejecutada. Las soluciones que valen la pena a menudo se obtienen por suerte entre la definición del problema y su realización.

Por lo tanto, se observa que si el proceso de diseño es planificado con mayor precisión dará como resultado mejores soluciones, ya que más personas pueden seguir el camino óptimo.

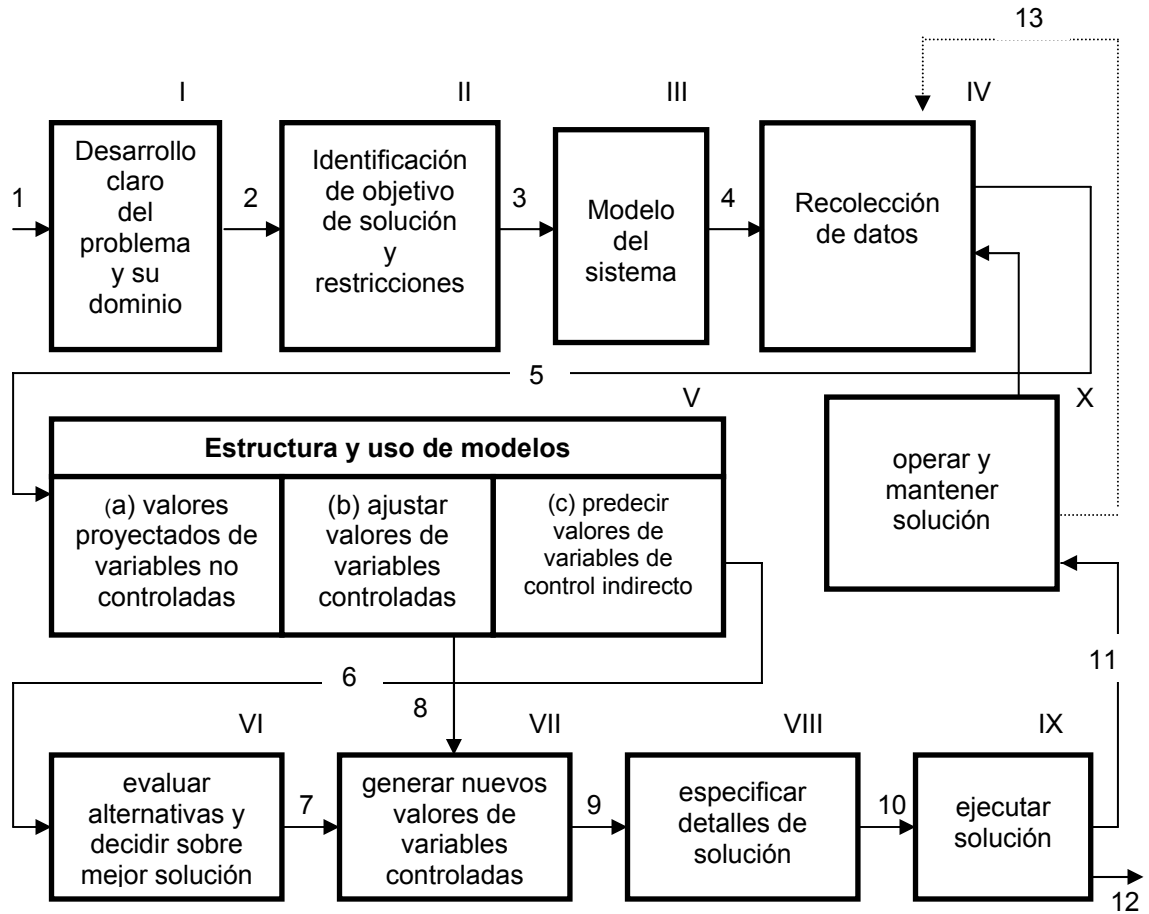
Este capítulo tiene la finalidad de lograr una mejor definición del proceso de solución de problemas, sobre todo, de aquellos que están relacionados con el transporte.

1.1 El proceso de resolver un problema

Para encontrar una solución más eficiente para los problemas de ingeniería es necesario apoyarse en un método racional que defina una serie de acciones por seguir y evite las improvisaciones que son comunes en Guatemala en donde, desafortunadamente, se recurre con mucha frecuencia al método de la prueba y el error, lo cual trae como consecuencia, la ineficiencia de las inversiones o el fracaso de los proyectos.

En ese sentido, se considera de gran utilidad el método descrito por John W. Dikey, que se detallará a continuación. (11-16)

Figura 1 Solución de problemas



Fuente: John W. Dickey, *Metropolitan Transportation Planning*. Pág. 17.

Excepto por dos grandes lazos de retroalimentación, el procedimiento de diez etapas de la Figura 1 se desarrolla en forma secuencial. Cada flecha indica, a la vez, dirección de movimiento y flujo de información a través del proceso, ya que cada etapa, de I a X indica una acción que debe ser tomada. Las acciones se desarrollan de la siguiente manera:

- I. Se hace una tentativa para definir tan precisamente como sea posible la naturaleza del problema y el campo dentro del cual existe.
- II. Dada la definición del problema, se concibe una serie de metas y objetivos que indiquen la dirección hacia la que debe ser orientada cualquier modificación que tienda que se convierta en candidata adecuada para una solución satisfactoria. También se definen las restricciones que no pueden ser excedidas por ninguna solución propuesta.
- III. A partir del campo en el cual el problema ha sido desarrollado, se plantea un modelo con las propiedades que se describirán en el siguiente capítulo.
- IV. Se lleva a cabo una recolección de datos en el campo estudiado, a los que se añade la información proveniente de publicaciones relevantes. Estos datos se usan, a la vez, para obtener una clara imagen del problema y su dominio, además de establecer parámetros en el modelo y valores pasados y presentes de las variables de interés.
- V. Los modelos desarrollados en III son afinados (se ajustan parámetros) y usados para determinar la futura magnitud del problema.
- VI. Se realiza la evaluación de la situación futura si no se hacen cambios, así como de las soluciones propuestas. También se toma una decisión entre las alternativas.
- VII. Las soluciones (modificaciones del diseñador) son generadas e incorporadas a las condiciones del problema. Estas soluciones se evalúan de nuevo en el VI y entonces, posiblemente, se hará más modificaciones. Esta retroalimentación repetitiva continúa hasta que se alcance una

solución adecuada o quizás la solución óptima, para estructurar un anteproyecto.

VIII. Los detalles de la solución se desarrollan y describen por medio de planos, especificaciones técnicas y legales, etc., de manera que constituyan los términos de referencia.

IX. La solución propuesta es desarrollada a través de procedimientos como los estudios de factibilidad, el diseño del proyecto, la adopción de medidas financieras y presupuestarias, la definición de políticas y así sucesivamente, hasta llegar a la construcción física.

X. La solución desarrollada es operada y mantenida. Se recolectan más datos para determinar si, de hecho, la solución guió a una reducción de la magnitud del problema como fue pronosticada en el modelo. Si éste no es el caso, entonces se harán cambios ya sea en el modelo, en las opciones o en ambas si fuera necesario.

1.1.1. La diferencia entre resolver un problema y la planificación

Usualmente, existen dos diferencias para resolver un problema y planificar, las cuales son:

- a. El tiempo involucrado.
- b. La amplitud de la situación estudiada.

Hay algunas consecuencias naturales en el período considerado en los esfuerzos de planificación y en la solución de problemas:

a. En cuanto al tiempo, se pueden notar las siguientes:

1. Podría esperarse que los pronósticos de variables, sobre las cuales no se tiene control para propósitos de planificación, tendrán como resultado una reducción en la confiabilidad de sus valores con el paso del tiempo.
2. Los problemas y objetivos relevantes de una situación de planificación pueden cambiar durante el período considerado, de manera que las soluciones basadas en problemas y objetivos presentes pueden estar desactualizados antes que sean desarrolladas.

Por otro lado, nuevos problemas pueden aparecer dentro del período planificado, y éstos deben ser anticipados en cualquier esfuerzo de planificación.

3. Una ventaja final de un análisis a largo plazo es que las soluciones anticipadas pueden ser ejecutadas secuencialmente, es decir, en bases programadas.

De esta manera, en lugar de realizar todos los cambios a la vez, el planificador usualmente tomará un pequeño subconjunto de metas y objetivos que se cumplirán en un subperíodo de tiempo y, si sus selecciones se hacen apropiadamente, él puede aumentar substancialmente los beneficios sobre el tiempo de dicho procedimiento secuencial.

Las soluciones que provienen del proceso de resolver un problema, generalmente no pueden ser programadas para un desarrollo secuencial y de esta manera lograr beneficios comparables con aquellos que se derivaron de la planificación.

- b. El segundo gran aspecto que diferencia la planificación de la resolución de problemas, es la amplitud del problema en cuestión. Planificación es el nombre dado al estudio de situaciones más amplias.

Pero es debido a su gran generalidad que nunca puede ser considerada para tener la profundidad de detalle requerido para proporcionar un producto final, entonces el proceso de resolver problemas puede ser considerado adjunto a la planificación, en donde son detalladas las especificaciones de cada concepto general de una solución surgida durante el proceso de planificación.

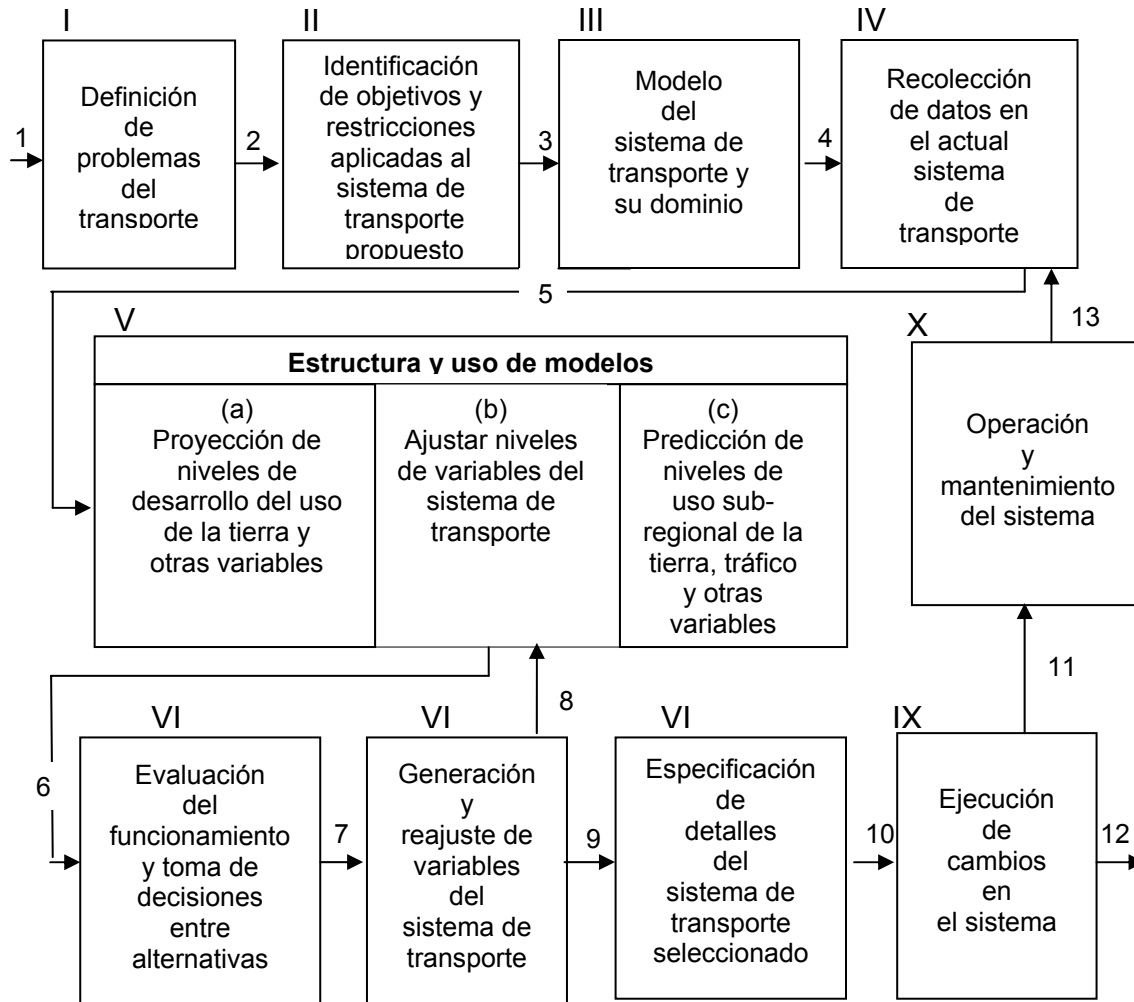
1.2. El proceso de planificación del transporte

El mayor impulso de cualquier estudio de planificación de transporte, involucra la determinación de la demanda de tránsito dentro de los “corredores” con mayor intensidad de tránsito de una región.

Este esfuerzo, entonces, es seguido con una tentativa de encontrar aquellos sistemas de transporte disponibles ahora o que pueden ser anticipados en el futuro, de manera que satisfagan aceptablemente las demandas establecidas de transporte.

De allí en adelante, conforme el tiempo progresa, los planes se harán más precisos, se hará la estimación presupuestaria, se determinarán las ubicaciones exactas, se decidirán programas de trabajo, etc., hasta que el sistema propuesto se convierta en una realidad.

Figura 2 Planificación del transporte



Fuente: John W. Dickey, *Metropolitan Transportation Planning*. Pág. 23.

1.2.1. Descripción general (Ver figura 2)

Cualquier proceso de planificación o diseño es iniciado con el intento de definir tan nítida y sucintamente como sea posible los tipos de problemas que

hay en el presente o que existieran en el futuro y el campo en el cual han sido determinados (etapa I).

Dada la definición general del problema y una descripción de su campo, se pueden identificar objetivos y restricciones que guiarán hacia la búsqueda de nuevas soluciones (etapa II).

Como ejemplo de objetivos se podría mencionar la intención de minimizar el tiempo de viaje a través de una región, maximizando el número de personas que usarán los parques vehiculares de transporte público, o influir en crecimiento dentro de una región con una serie de mejoras en el sistema de transporte.

Las restricciones más relevante a estos objetivos podrían ser el presupuesto anual del departamento local o nacional de carreteras, las regulaciones para la obtención del derecho de vía y la cantidad de materiales clasificados cercanos al lugar en donde se desarrollan los trabajos de mejoramiento propuestos.

En la etapa III del proceso de planificación del transporte se hace una tentativa de modelar de manera abstracta el sistema de transporte y su dominio. A continuación se indican los tres tipos de modelos más utilizados, que son:

- (1) Modelos que describen los factores que afectan una situación particular y su relación con el transporte (desarrollo del uso de la tierra, contaminación del aire, ruido, etc.).

- (2) Aquellos que describen el comportamiento del tránsito o la “demanda” de instalaciones viales.
- (3) Modelos donde se describen las características de varias formas de la tecnología del transporte (suministros).

Al tener la imagen general de estos tipos de modelos se puede proceder a un esfuerzo racional de recolección de datos (etapa IV), cuya principal intención es proveer la información necesaria para establecer los parámetros (restricciones, coeficientes, exponentes, etc.) para cada modelo.

La etapa de recolección de datos tiene otro papel importante que es el desarrollo más exacto de la definición de problemas, el campo del mismo, sus objetivos y restricciones.

Lo que previamente pudo haber sido definido como un problema de congestión general, después de recolectar más información, puede ser especificado en función del retraso por vehículo al pasar por un punto en estudio en un tiempo determinado.

En la etapa V, al utilizar los datos recolectados, se afinan los resultados de los modelos tales como los del desarrollo del uso de la tierra, de factores que afectan al sistema, demanda de tránsito y de suministros de transporte.

Simultáneamente, se trata de predecir el estado futuro del ambiente y los factores que afectan al transporte, si no se hacen cambios en el sistema.

Las consecuencias de dicha alternativa, cuando se evalúan en la etapa VI del proceso de planificación, usualmente son peores que aquellos en el

estado actual. Los retrasos al conducir serán mayores que en el presente, las estructuras utilizadas para el tránsito se espera que se deterioren; el crecimiento inducido de la región puede que no sea el deseable.

Como consecuencia de este pobre funcionamiento anticipado, se deben generar modificaciones al sistema actual de transporte (etapa VII), y esta generación se debe hacer de tal manera que los objetivos adscritos en la etapa II, se cumplan con el grado más alto posible.

En este punto del desarrollo del proceso, las modificaciones sugeridas no se deben aplicar directamente, debido a que es muy importante el ciclo de retroalimentación (flecha 8), que existe en la mayoría de instancias.

Lo principal de esta retroalimentación es el impacto del sistema de transporte modificado en el uso de la tierra en varias partes de la región en la cantidad, dirección y modo de transporte, además de otros factores que afectan como la contaminación del aire y la apariencia. Este impacto debe ser reevaluado en la etapa VI, en donde es posible que se añadan algunas modificaciones al sistema de transporte.

Finalmente, después de algunas iteraciones a través de estas tres etapas (V a VII), puede tomarse una decisión entre las opciones de solución que fueron generadas.

Esta solución escogida puede ser ajustada en mayor detalle en la etapa VIII y traerla a existencia en la etapa IX, la etapa de desarrollo de proyecto. La operación y mantenimiento del sistema ya desarrollado sería el siguiente paso (etapa X).

Con esta etapa se concluye el esfuerzo principal del proceso de planificación, y aún así permanece la necesidad de recolectar información como base de la evaluación del sistema de transporte desarrollado.

Además la planificación nunca debe ser un esfuerzo de una única vez, ya que debe ser considerada como un esfuerzo continuo, con soluciones que se ven alteradas cuando aparecen nuevos aspectos del problema, cambios en las metas y objetivos, y cuando sea posible la aplicación de mejoras en la tecnología del transporte.

1.2.2. Problemas del transporte y su ámbito

Definir cualquier tipo de problema y su respectivo ámbito espacial es frecuentemente una de las tareas encaradas por cualquier diseñador o planificador. Los problemas del transporte en particular, exhiben esta dificultad, primero porque la mayoría de los problemas no ocurren solamente en el espacio, sino en el tiempo y segundo, porque los problemas son jerárquicos por naturaleza.

Lo que se quiere dar a entender con estos conceptos, es que el planificador debe estar dispuesto a identificar el área de la región y sus sub componentes, en los cuales se puede esperar que cierto tipo de problemas aparezcan en el futuro o dentro del período de análisis.

El encargado de la planificación debe tener la capacidad de percibir el espectro total de los problemas desde los que están extremadamente localizados hasta los que afectan a toda la región. Para cumplir con esta tarea

el planificador, usualmente, podría seguir el procedimiento que se presenta a continuación:

1. Delimitar dentro de lo posible la región en donde las actividades que ocurren son tan independientes de aquellas que ocurren fuera de la misma. De esto resulta una línea de demarcación a la que se le llama cordón perimetral.
2. Dividir la región acordonada en una serie de zonas o subregiones cuyas áreas son lo suficientemente pequeñas para que la mayoría de problemas puedan ser señalados de manera exacta pero del tamaño adecuado para que los estudios no se saturen de información.
3. Finalmente, a través del contacto con las partes interesadas, el planificador puede definir varios tipos de problemas de los servicios del transporte, los cuales caen dentro del amplio rango que varía desde los problemas de acceso regional hasta los de congestión localizada. Como parte de este esfuerzo, debe hacerse una tentativa de identificar aquellos factores, tanto en el medio natural, como en el desarrollado por el hombre, que pueden contribuir a ser derivados de las deficiencias del sistema de transporte.

El resultado de este proceso de tres etapas es la identificación del servicio del transporte y sus problemas afines.

1.2.3. Definición de objetivos y restricciones

Cuando se busca la solución de problemas se debe hacer el intento de que los objetivos de dicha solución sean tan concretos como sea posible al tomar en cuenta las limitaciones de tiempo y de dinero, financieras, políticas y sociales para que las opciones de solución estén dentro de un rango de aceptabilidad para su evaluación y, de ésta manera, satisfagan los objetivos específicos que se persigue cumplir.

1.2.4. Modelar el sistema de transporte y su dominio

El tema de la abstracción de modelos será cubierto en forma más amplia en el siguiente capítulo, sin embargo, por el desarrollo de la descripción del proceso de planificación conviene mostrar la forma en que los modelos se aplican en el mismo.

El desarrollo de modelos se utiliza para representar las interrelaciones entre los sistemas de transporte y su transformación, tránsito y algunos otros factores incluidos en la etapa III de la planificación del transporte. A continuación se presenta una descripción de la etapa de estructuración y uso de modelos (etapa V) en el contexto del proceso de planificación del transporte.

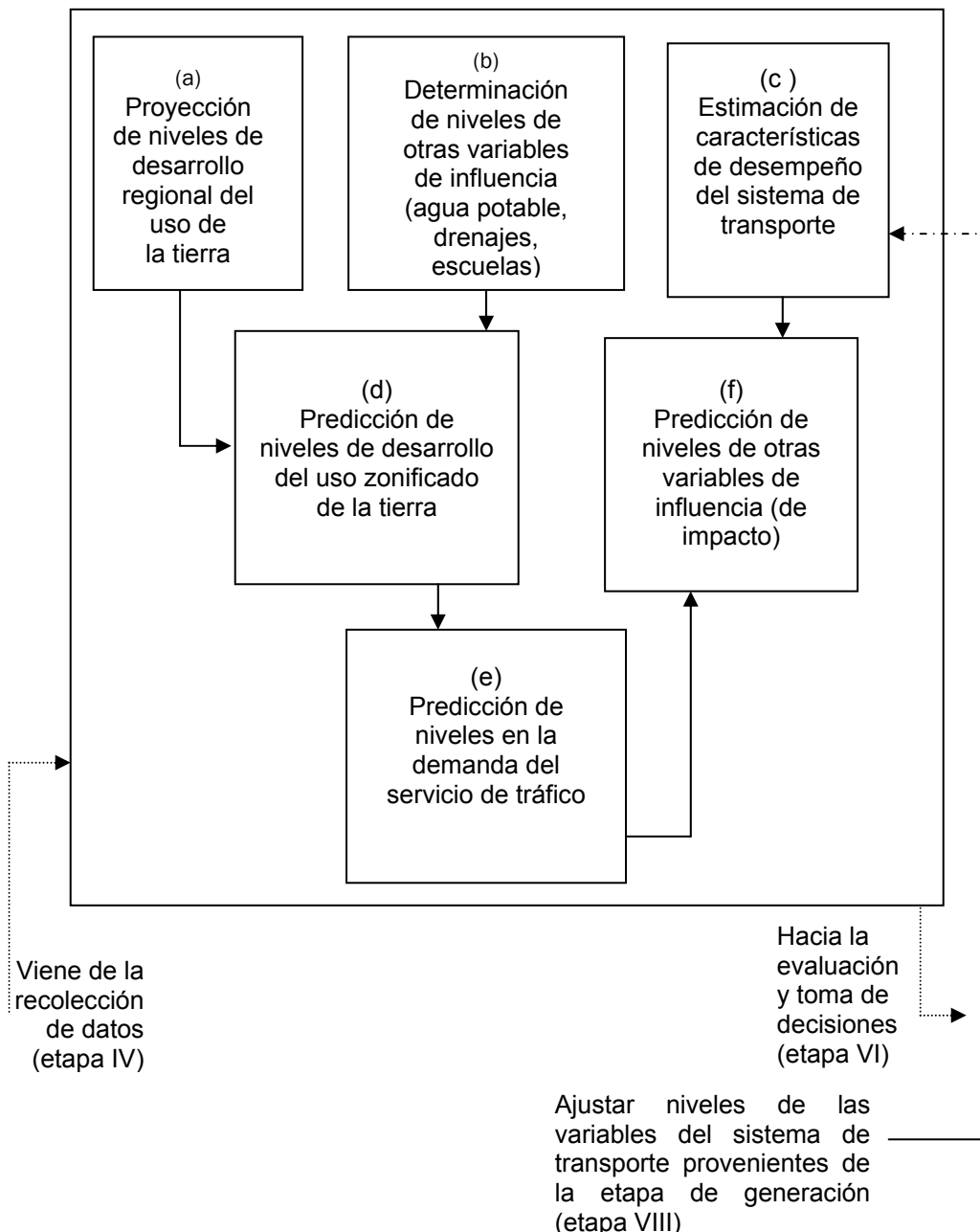
La etapa V ha sido dividida en seis fases, cada una de éstas corresponde a un tipo de modelo (o serie de modelos), que genera información para la etapa de prueba y evaluación. Dichas fases y sus interconexiones se han resumido en la Fig. 3 (ver pág. 16).

Es más fácil entender este diagrama, cuando se observan las entradas y salidas de información de la etapa de estructuración y uso de los modelos, para luego analizar los procesos internos del modelo.

La mayor entrada de información a todas las fases la etapa V, proviene de la etapa de recolección de datos (etapa IV) del proceso de planificación. Además, la fase (c) de la etapa V, que consiste en la estimación de las características de funcionamiento del sistema de transporte, puede ser cumplida únicamente a través del conocimiento del tipo de sistema que se ha considerado como solución.

Esta información proviene de la etapa VIII (etapa de generación de alternativas de solución) donde son formuladas las nuevas soluciones. La conexión se representa en el diagrama por la línea punteada vertical en la Figura 3 (ver pág. 16). Las salidas de información de la etapa V, a su vez, alimentan de información a la etapa de evaluación y toma de decisiones (etapa VI).

Figura 3 Fases de la etapa V del proceso de planificación del transporte



Fuente: John W. Dickey, *Metropolitan Transportation Planning*. Pág. 28.

Viendo ahora el trabajo interno de la etapa V, se observa que la predicción del desarrollo zonificado del uso de la tierra (fase (d)), requiere información de tres fases de los cinco restantes, y este hecho será aprovechado para explicar la interacción entre fases.

Se utilizará como ejemplo el modelo del uso de la tierra. Este modelo se aplica para realizar estimaciones de la ubicación futura de las diferentes zonas donde se realizan las actividades humanas, así como de las intensidades de crecimiento de población, empleos y uso de las áreas antes mencionadas.

Las entradas de información de las fases a, b, y c de la figura 3 pueden ser identificadas directamente, con los niveles proyectados del crecimiento de población y empleo, que provienen de la fase (a), información de los servicios municipales presentes y futuros, además de los de transporte, que se originan en (b) y las características de funcionamiento del sistema de transporte (fase c).

La información del estado actual de la región bajo estudio, es representada gráficamente en la Fig. 3 por medio de la flecha que proviene de la etapa de recolección de datos.

En el diagrama del trabajo de la etapa V también se observa otras dos relaciones. La primera de ellas se lleva a cabo entre el nivel futuro de desarrollo de las zonas de uso de la tierra, y la característica de funcionamiento del sistema de transporte propuesto, relación fundamental para la descripción de los patrones futuros de viaje, es decir, la determinación de la demanda del servicio de tránsito (fase e). Esta aseveración se comprueba, en el hecho de que los viajes que se realizan de los centros de población hacia las ubicaciones de trabajo, no se pueden hacer sin las instalaciones viales.

La segunda de las relaciones mencionadas en el párrafo anterior, se efectúa en la estimación de factores que afectan el ambiente, como ruido, contaminación del aire, basura, etc., con fines de medir su impacto en el sistema (etapa f).

1.2.5. Recolección de datos

En el caso del campo de estudio de la planificación del transporte, no se pueden generar modelos sin antes detallar una situación particular, debido a que los parámetros (constantes, coeficientes, exponentes, etc.) que permanecen estables en el área estudiada, no han sido determinados. Como consecuencia, se debe realizar un esfuerzo por recabar toda la información que sea posible para cada estudio del transporte y con dicha información estructurar los modelos necesarios, es decir, se determinan sus parámetros.

También se hace énfasis en el propósito adicional de la recolección de datos, que es una identificación más precisa de los problemas, sus dominios, objetivos y restricciones. Al ejecutar las etapas I y II del proceso de planificación, solo se generan ideas vagas de los problemas existentes y las direcciones hacia las que deben ser dirigidas nuevas soluciones.

A continuación se hará un resumen de la clasificación de la información que se desea reunir:

1. Definición de problemas (actuales y de un futuro previsto).
2. Definición de objetivos y restricciones (presente y futuro).
3. Tipos de modelos (presente).
4. Tipos, ubicación e intensidad del uso de la tierra.

5. Características del sistema de transporte (presente).
6. Tránsito (pasado y presente).
7. Tecnología aplicada al transporte (actuales y de un futuro previsto).
8. Otros factores que influyen en la situación (presente y futuro).
9. Procedimientos de evaluación (presente).
10. Procedimientos de ejecución (presente).

Debe notarse que el agrupamiento de esta información es una tarea ardua y pesada, en la que el ingeniero o el planificador tiene la responsabilidad de mantenerse actualizado en áreas de estudio como la detección de información, manipulación y ordenamiento de datos, almacenamiento y técnicas de presentación.

También se deben hacer los esfuerzos necesarios para resolver los problemas de muestreo, errores, equivocaciones, propensión y prefabricación en la recolección de datos. De hecho, el resultado de estos esfuerzos constituye en sí mismo una información adicional que debe ser recolectada.

1.2.6. Evaluación de funcionamiento y toma de decisiones

Supóngase que ya ha sido efectuada la recolección de información para estructurar y usar modelos (etapa V del proceso de planificación), con la premisa que no se harán cambios en el sistema de transporte existente.

Las transformaciones que pueden originarse de esta situación "sin cambios", serán observadas en los factores que serán evaluados en la etapa VI, como lo son el desarrollo del uso de la tierra, tránsito de la región y otros factores de influencia.

Se espera que en dicha circunstancia, el examen del funcionamiento, muestre que los factores antes mencionados estarán en peores condiciones que en la actualidad.

Al hacer la suposición inicial, de que no se realizarán cambios, se establece un límite inferior que permita que las modificaciones al sistema actual de transporte, generadas en la etapa VII, puedan ser juzgadas.

En otras palabras, el funcionamiento de un sistema de transporte modificado, en lo concerniente tanto al tránsito como su impacto en el medio ambiente descansará en algún lugar entre el límite inferior previamente mencionado y el otro extremo, donde existe la completa seguridad del cumplimiento de los objetivos propuestos.

Dados los límites superior e inferior, entonces el diseñador estará capacitado para juzgar cada modificación al sistema cuando se lleve a cabo la retroalimentación de la etapa generadora (etapa VIII) y del replanteo del modelo (etapa V) a la etapa de evaluación (etapa VI). (Ver la flecha 8 correspondiente a la de retroalimentación en la fig. 2.

1.2.7. Generación de alternativas en la solución del transporte

En la etapa de generación del proceso de planificación, se persigue reunir los cuatro componentes del sistema de transporte (vehículos, redes de comunicación, terminales, y controles) de tal manera, que se acerquen como sea posible al cumplimiento de los objetivos del transporte y del medio ambiente.

En otras palabras, la tarea del ingeniero es escoger dentro de todos los componentes disponibles, aquellos que provean la mayor efectividad o beneficio. En la generación de soluciones está sumamente involucrada la creatividad.

Dentro de las herramientas del proceso de creatividad, existe una serie de técnicas que han sido desarrolladas con el afán de que evolucionen y se conviertan en mejores soluciones. La técnica más sofisticada de éstas, es la programación matemática (programación del tipo lineal, no lineal, programación dinámica etc.), cuya utilidad consiste en que involucra la optimización de algunas funciones matemáticas de ciertos objetivos, cuando existen restricciones.

Por supuesto que se llega a la “mejor solución”, siempre y cuando se tenga un comportamiento medible de los objetivos y de sus restricciones. Desafortunadamente, la mayoría de los objetivos y restricciones no son lo suficientemente explícitos como para ser analizados con este enfoque.

Se cuenta con otros métodos de trabajo en la generación de soluciones, dentro de los cuales se pueden mencionar la investigación y el diseño experimental.

En el primero de éstos, se toma uno de los modelos propuestos en la etapa V, en el cual se hace una sustitución sistemática de los valores de las variables conocidas, de acuerdo con los resultados provenientes de cada alteración. Teóricamente cada nueva solución es mejor que la anterior, de manera que con dichas progresiones, se alcanzará la solución óptima. En el procedimiento del diseño experimental se actúa de manera similar, pero se realizan experimentos en el sistema mismo, no en sus modelos.

La solución propuesta tendrá que ser analizada para determinar, primero su impacto en el sistema de transporte, en el uso de la tierra y otros factores y segundo para establecer el grado del cumplimiento de los objetivos propuestos.

1.2.8. Especificaciones de detalles de solución al sistema de transporte

Hasta esta etapa del proceso de planificación, la descripción del sistema actual de transporte, su dominio y las futuras modificaciones al mismo ha sido en extremo amplia, acentuando solo en sus características más generales.

Se ha tratado únicamente con estimaciones preliminares de costos, velocidades, capacidades y así sucesivamente, que han sido obtenidas de cómputos pasados o de pruebas preliminares con sistemas similares. Es entonces cuando compete al diseñador, a través de la etapa de especificación, detallar la solución escogida a tal grado como sea necesario, para construir y operar el sistema propuesto.

Por ejemplo, en el diseño de carreteras se requieren ubicaciones exactas de la geometría de las propiedades y viviendas, de los linderos así como detallar la información completa del alineamiento horizontal, vertical y transversal del proyecto, incluyendo todas las estructuras de drenaje.

Se debe enfatizar que la salida de información de la etapa de especificación de soluciones no siempre será un juego de planos o alguna otra forma de representación física.

Las especificaciones pueden tomar la forma de leyes, definición de políticas o medidas generales presupuestarias o financieras.

1.2.9. Ejecución del proyecto

La novena etapa del proceso de planificación es la que trae a la realidad el plan o solución específica. Los procedimientos de construcción juegan un papel importante en esta etapa, así que debe haber una preocupación para que exista una buena práctica en la administración en esfuerzos tales como el manejo de los materiales y la calendarización de proyectos de construcción.

Los planificadores deben tener conocimiento de otros aspectos relevantes a la ejecución, que puedan incluir los siguientes:

Administración	Políticas
Finanzas	Presupuestos
Impuestos	Mejoramiento de la programación
Cotizaciones	Costos
Mercadeo	Administración de personal
Publicidad	Investigación y desarrollo
Contabilidad	Relaciones públicas

En un plano ligeramente diferente está el tema del control del uso de la tierra, dentro del cual se encuentran los conceptos de zonificación; legislación respecto al uso de una propiedad particular; regularización de particiones, que se refiere a la manera por la que un terreno perteneciente a un solo propietario, es convertido en lotes ocupados por edificaciones y los procedimientos para obtener las áreas requeridas para uso público (como el transporte).

Al tomarse conjuntamente estos factores, se cuenta con grandes herramientas para la ejecución de las obras y la certidumbre de la estabilidad de cualquier solución planificada.

1.2.10. Operación y mantenimiento

La mención de los temas de zonificación y regularización de subdivisión de la tierra, implica que la etapa de ejecución es pertinente no solo para la realización de la solución, sino que deben continuarse con la operación y mantenimiento (etapa X). Se debe vigilar constantemente el funcionamiento del sistema para asegurarse que los objetivos planteados se cumplan al grado previsto originalmente.

Lo requerido en este punto es un control del proceso, indicado por las flechas 11 y 13 de la Fig. 2, en las cuales existe una colección de información actualizada, referente a la operación y mantenimiento del sistema, una evaluación de los registros más recientes del funcionamiento del mismo y la descripción detallada de ciertos ajustes que mejoran su funcionamiento al nivel deseado.

En consecuencia, la operación y mantenimiento realmente involucra un ciclo continuo de la etapa III a la IX del proceso de planificación, haciendo énfasis en el refinamiento de las partes más detalladas de las soluciones generales obtenidas anteriormente.

Al observar los detalles de la etapa de operación y mantenimiento, serán de interés algunos de los siguientes artículos:

Operación

Recolección de información de tarifas y otros cargos.

Administración de personal.

Contabilidad de costos de ingresos y egresos.

Preparación de presupuestos.

Planes para emergencias.

Mantenimiento

Limpieza y chapeo del derecho de vía.

Inspección de componentes (pavimento, señalización, terminales, etc.).

Reparación y/o cambio de componentes.

El listado propuesto variará de acuerdo con la naturaleza del sistema de transporte considerado.

2. ESTRUCTURACIÓN Y USO DE MODELOS MATEMÁTICOS PARA DESCRIBIR EL COMPORTAMIENTO DEL TRÁNSITO

Los estudios de tránsito se apoyan en el análisis estadístico de una serie de hechos hasta llegar a desarrollar, como consecuencia de este análisis, una serie de funciones que presentan un carácter casi general.

Algunos investigadores han hecho analogías de tipo teórico al comparar el comportamiento del tránsito con el movimiento de un fluido en una tubería. En otros casos, se ha tratado ciertos aspectos de la circulación como fenómenos aleatorios tratándolos, por consiguiente, mediante procedimientos estadísticos. Así se ha podido estudiar, por ejemplo, ciertos problemas de intersección y de colas de espera.

A su vez, el desarrollo de las computadoras ha sido útil para los estudios de tránsito y, actualmente, la técnica de simulación apoyada en teorías matemáticas, es una de las que ofrece perspectivas más seguras para avanzar en la solución de muchos problemas planteados, como por ejemplo, el control electrónico de la circulación, el control de los accesos a las autopistas, y el congestionamiento. (20-25)

2.1. Definición de modelo

Se llama así a la representación o descripción de una estructura y /o comportamiento de su contraparte de la vida real. Existe alguna correlación entre el modelo y la realidad, aunque ésta es menos que perfecta. (11-14)

En general, el modelo de una situación real cualquiera contiene los siguientes elementos:

- Variables sobre las cuales el diseñador tiene control total X_i
- Variables sobre las cuales el diseñador no tiene control Z_j
- Variables sobre las cuales el diseñador tiene control indirecto Y_k
- Relaciones generales entre las variables antes mencionadas R_m
- Parámetros (coeficiente, constantes, exponentes, etc.) en las relaciones antes mencionadas. P_m

Simbólicamente un modelo M está representado por:

$$M = (X_i, Z_j, R_m, P_m) \text{ para todo } i, j, k, m, n$$

2.2. Descripción de variables utilizadas en los modelos

A continuación se representa una descripción de algunas de las características fundamentales del movimiento vehicular, representadas en sus tres variables principales: el flujo, la velocidad y la densidad.

Luego de la deducción de las relaciones se puede determinar las características de la corriente de tránsito y así predecir las consecuencias de diferentes opciones de operación o de diseño.

El conocimiento de estas tres variables también reviste singular importancia, ya que éstas indican la calidad o nivel de servicio experimentado por los usuarios de cualquier sistema vial. A su vez, estas tres variables pueden ser expresadas en términos de otras llamadas variables asociadas.

Volumen

Se define como el número de vehículos que pasa por un punto o sección transversal de un carril o de una calzada, durante un período determinado.

Tasa de flujo o flujo (q)

Número de vehículos que durante un período inferior a una hora llega a un punto determinado.

Volúmenes de tránsito promedio diario (TPD)

Se define como el número total de vehículos que pasa durante un período dado (en días completos) igual o menor a un año y mayor que un día, dividido entre el número de días del período.

Volúmenes horarios

Según la hora seleccionada, se definen los siguientes volúmenes de tránsito horarios, dados en vehículos por hora.

Volumen horario máximo anual (VHMA)

Es el máximo volumen horario que ocurre en un punto o sección de un carril durante un año determinado. En otras palabras, es la hora de mayor volumen de las 8,760 horas del año. (10-154)

Volumen horario de máxima demanda

Es el máximo número de vehículos que pasa por un punto determinado o de una calzada durante 60 minutos consecutivos. Es el representativo de los períodos de máxima demanda que se pueden presentar durante un día particular. También se le llama volumen de hora pico.

Volumen horario –décimo, vigésimo, trigésimo-anual

Es el volumen horario que ocurre en un punto o sección transversal de un tramo carretero durante un año determinado, que es excedido por 9, 19, y 29 volúmenes horarios, respectivamente. También se le denomina volumen horario de la 10^a, 20^a. y 30^a hora de máximo volumen. (10-155)

Volumen horario de proyecto (VHP)

Es el volumen de tránsito que servirá para determinar las características geométricas de la vía. Fundamentalmente, se proyecta con un volumen horario pronosticado. No se trata de considerar el máximo número de vehículos por hora que se puede presentar dentro de un año, ya que exigiría inversiones cuantiosas, sino un volumen horario que se pueda dar un número máximo de veces en el año, previa convención al respecto.

Variables asociadas con el flujo

Las variables relacionadas con el flujo son el intervalo simple entre vehículos consecutivos y el intervalo promedio entre varios vehículos.

Intervalo simple (h_j)

Es el lapso entre el paso de dos vehículos consecutivos, generalmente expresados en segundos y medido entre puntos homólogos del par de vehículos. (10-247)

Intervalo promedio (h)

Es el promedio de todos los intervalos simples, h_i , existentes entre los diversos vehículos que circulan por un sistema vial. Se expresa en segundos por vehículo (s/veh) y mediante la siguiente expresión (10-247):

$$h = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} h_i}{N - 1} \quad (2.1)$$

Donde:

H = intervalos promedio (s/veh).

N = número de vehículos (veh).

N-1 = número de intervalos (veh).

H_i = intervalos simples entre los vehículos i e $i + 1$

Demora

Intervalo del tiempo consumido por el tránsito o un componente específico del mismo, cuando se le impide su movimiento por algún elemento sobre el cual no se tiene control. Se expresa en seg. / vehículo.

Velocidad

La velocidad es uno de los principales indicadores que se utilizan para medir la calidad de la operación a través de un sistema de transporte.

Los conductores, considerados de una manera individual, miden la calidad de su viaje por la comodidad y libertad para realizar maniobras y conservar uniformemente la velocidad deseada, por lo tanto, debe ser estudiada, regulada y controlada con el fin de que se origine un perfecto equilibrio entre el usuario, el vehículo y la vía, de tal manera que siempre se garantice la seguridad.

En general, el término velocidad se define como la relación entre el espacio recorrido y el tiempo que se tarda en recorrerlo. Es decir, para un vehículo representa su relación de movimiento, casi siempre expresada en kilómetros por hora (Km/h).

Velocidad instantánea

Es la velocidad de un vehículo en el preciso instante en que éste pasa por un determinado punto de una carretera o de una calle. También se le llama velocidad de punto.

Velocidad de diseño

Es la velocidad máxima a la cual pueden circular los vehículos con seguridad sobre una sección específica de una vía, cuando las condiciones atmosféricas del tránsito y del pavimento son tan favorables que las características geométricas del proyecto gobiernan la circulación. Todos los elementos geométricos del alineamiento horizontal, vertical y transversal dependen de la velocidad de proyecto.

La selección de la velocidad de diseño depende de la importancia o categoría de la futura vía, de los volúmenes de tránsito que va a mover, de la configuración topográfica de la región, del uso del suelo y de la disponibilidad de recursos económicos. (10-221)

Espaciamiento simple (si)

Es la distancia entre el paso de dos vehículos consecutivos, usualmente expresada en metros y medida entre sus defensas traseras. (10-255)

Espaciamiento promedio (s)

Es el promedio de todos los espaciamentos simples, existentes entre los diversos vehículos que circulan por una vía. Por tratarse de un promedio, se expresa en metros por vehículo (m/veh) y se calcula mediante la expresión (10-255):

$$S = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} si}{N - 1} \quad (2.2)$$

Donde:

- S = espaciamiento promedio (m/veh).
- N = número de vehículos (veh).
- N-1 = número de espaciamentos (veh).
- Si = espaciamiento simple entre el vehículo i y el vehículo i + 1.

2.3. Conceptos generales de capacidad y niveles de servicio

2.3.1. Capacidad vial

Se define como el número máximo de vehículos o peatones que pueden pasar por un punto o sección uniforme de un carril o calzada durante un período de tiempo dado, en las condiciones predominantes de la infraestructura vial del tránsito y los dispositivos de control.

Estas condiciones son factores que al variar modifican la capacidad de la vía y a continuación se hará una breve descripción de las mismas.

Condiciones de la infraestructura vial

Son las características físicas de la carretera o calle que incluye la geometría de la vía (anchos de carril y hombros, visibilidad, alineamientos horizontal y vertical), su régimen de flujo, el desarrollo de su entorno y el tipo de terreno donde se aloja la obra.

Condiciones del tránsito

Se refiere a la distribución del tránsito en el tiempo y en el espacio así como su composición en tipos de vehículos (vehículos livianos, autobuses, camiones y trailers).

Condiciones de control

Hacen referencia a los dispositivos para el control del tránsito, tales como semáforos y señales restrictivas (alto, ceda el paso, no estacionar, etc.)

2.3.2. Nivel de servicio

El concepto de nivel de servicio es definido como una medida cualitativa que describe las condiciones operacionales dentro de una corriente de tránsito y su percepción por los pilotos y/o pasajeros.

La definición de nivel de servicio, generalmente, describe estas condiciones en término de factores tales como la velocidad y tiempo de viaje, libertad de maniobra, interrupciones de tránsito, comodidad, conveniencia y seguridad.

Se define seis niveles para cada tipo de instalación, para cada una de las cuales se tienen procedimientos disponibles. Se les designa con una letra, de la A a la F, el nivel de servicio A es representativo de las mejores condiciones de operación y F de las peores.

A continuación se describen las que son utilizadas para representar las condiciones del tránsito en vías de flujo continuo (19-II.2)

Nivel de servicio A

Representa flujo libre, los usuarios individuales, virtualmente no se encuentran afectados por la presencia de otros en la corriente de tránsito.

La libertad de seleccionar las velocidades deseadas y maniobrar dentro de la corriente de tránsito es en extremo alta. El nivel general de comodidad y conveniencia provista al usuario es excelente.

Nivel de servicio B

Es el rango de flujo estable, pero la presencia de otros usuario en la corriente de tránsito, empieza a notarse. La libertad de seleccionar las velocidades deseadas relativamente no se encuentra afectada, pero existe una ligera declinación de la libertad para maniobrar dentro de la corriente de tránsito de nivel de servicio A.

El nivel de comodidad y conveniencia provistas es algo menor que al nivel de servicio A, porque la presencia de otros en la corriente de tránsito, empieza a afectar el comportamiento individual.

Nivel de servicio C

Está en el rango de flujo estable, pero marca el rango de flujo en el cual la operación de usuarios individuales empieza a ser significativamente afectada por la interacción con otros en la corriente de tránsito. La selección de velocidad, está afectada ahora por la presencia de otros y la maniobrabilidad dentro de la corriente de tránsito requiere constante vigilancia por parte del usuario. El nivel general de comodidad y conveniencia ha declinado notablemente a este nivel.

Nivel de servicio D

Representa alta densidad pero aún así hay flujo estable. La velocidad y la libertad de maniobra son severamente restringidas y el conductor o el peatón experimentan, generalmente, un nivel pobre de comodidad y conveniencia. Pequeños incrementos en el flujo de tránsito muchas veces causan problemas de operación a este nivel.

Nivel de servicio E

Representativo de las condiciones de operación a toda la capacidad de la vía o cercana a ella. Todas las velocidades se reducen a un valor bajo, pero relativamente uniforme. La libertad de maniobrar dentro de la corriente de tránsito, es en extremo difícil y casi siempre se cumple que un vehículo o un peatón dado, se ven forzados a “dar vía” para acomodarse a dichas maniobras.

Los niveles de comodidad y conveniencia son extremadamente pobres y la frustración del conductor o del peatón, generalmente es alta. Las operaciones a este nivel son usualmente inestables, porque pequeños incrementos en el

flujo o perturbaciones menores dentro de la corriente de tránsito causarán el colapso de flujo vehicular.

Nivel de servicio F

Es usado para definir el flujo forzado o colapsado. Esta condición existe dondequiera que la cantidad de tránsito que se aproxima a un punto, excede la cantidad que pueda atravesar dicho punto. Se forman colas detrás de dichas ubicaciones. La operación dentro de la cola, se caracteriza por oleadas intermitentes de marcha y parada, son considerados extremadamente inestables.

Los vehículos pueden adelantar a velocidades razonables por algunas decenas de metros o más, entonces se requiere que se detenga en una modalidad cíclica. El nivel F es usado para describir las condiciones de operación dentro de la cola, también como el punto de colapso.

Debe notarse, de cualquier manera, que en muchos casos las condiciones de operación de vehículos o de peatones descargados de la cola, puedan ser bastante buenas. Aún así, es el punto al cual el flujo de entrada excede el flujo de descarga, razón por la cual se forman colas y el término nivel de servicio F es adecuado a dichos puntos.

2.4. Características de los volúmenes de tránsito

Los volúmenes de tránsito se consideran dinámicos, por lo que solamente son precisos para el período de duración de los aforos.

Sin embargo, debido a que sus variaciones son generalmente rítmicas y repetitivas, es importante tener un conocimiento de sus características.

En la planeación y operación de la circulación vehicular, es fundamental conocer estas variaciones periódicas de los volúmenes de tránsito dentro de las horas pico, en las horas del día, en los días de la semana y en los meses del año.

Otras características de los volúmenes de tránsito son sus variaciones en función de la distribución por carriles, la distribución direccional y su composición.

2.4.1. Distribución y composición del tránsito

La distribución de los volúmenes de tránsito por carriles es un parámetro que se utiliza, tanto en el diseño como en la planificación de la operación de calles y carreteras. Tratándose de la operación de tres o más carriles en un sentido, el flujo se asemeja a una corriente hidráulica.

Al medir los volúmenes de tránsito por carril, en zonas urbanas, la mayor velocidad y capacidad, generalmente, se logra en el carril del centro; las fricciones laterales, como paradas de autobuses y taxis y las vueltas a la izquierda y a la derecha causan un flujo más lento en los carriles extremos, llevando el menor volumen el carril cercano a la acera.

En carreteras, a volúmenes bajos y medios, suele ocurrir lo contrario por lo que se reserva el carril cerca del arriate central para vehículos más rápidos y

para rebasar; se presentan mayores volúmenes en el carril inmediato al hombro.

En cuanto a la distribución direccional, en las calles que comunican el centro de la ciudad con la periferia de la misma, el fenómeno común que se presenta en el flujo de tránsito es de volúmenes máximos hacia el centro en la mañana y hacia la periferia en las tardes y noches.

La composición y variación de los distintos tipos de vehículos se refieren al porcentaje del volumen total de automóviles, buses y vehículos pesados.

2.4.2. Variaciones del volumen en el tiempo

2.4.2.1. Variación del volumen en la hora de máxima demanda

En zonas urbanas, la variación de los volúmenes de tránsito dentro de una misma hora de máxima demanda, para una calle o intersección específica, puede llegar a ser repetitiva y consistente durante varios días de la semana. Sin embargo, puede ser bastante diferente de un tipo de calle o intersección a otro, para el mismo período máximo.

En cualquiera de estos casos, es importante conocer la variación del volumen dentro de la horas de máxima demanda y cuantificar la duración de los flujos máximos, para realizar así la planeación de los controles del tránsito para estos períodos durante el día, tales como la prohibición de estacionamiento, prohibición de vuelta y disposición de los tiempos de los semáforos.

Un volumen horario de máxima demanda, a menos que tenga una distribución uniforme, no necesariamente significa que el flujo sea constante durante toda la hora. Esto quiere decir que existen períodos cortos dentro de la hora con tasas de flujo mucho mayores, a las de la hora misma.

Se llama factor de la hora pico, FHP, a la relación entre el volumen horario de máxima demanda, VHMD, y el flujo máximo, q_{\max} , que se presenta durante un período dado dentro de dicha hora y se expresa como (19-X.8):

$$FHP = \frac{VHMD}{N(q_{\max})} \quad (2.3)$$

Donde:

FHP = factor de hora pico.

VHMD = volumen horario de máxima demanda (Veh/h).

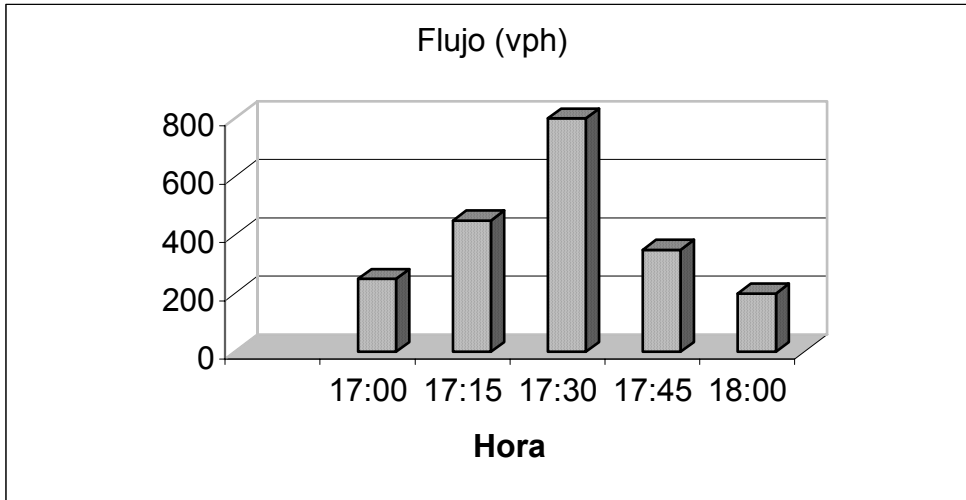
N = número de períodos durante la hora de máxima demanda (horas).

q_{\max} = flujo máximo (veh).

El período de menor duración en que se considera que existen flujos estables es el lapso de 15 minutos, por lo que N toma el valor de 4.

El factor de la hora pico es un indicador de las características del flujo de tránsito en períodos máximos. Indica la forma en que están distribuidos los flujos máximos dentro de la hora. Su mayor valor es la unidad, lo que significa que existe una distribución uniforme de flujos máximos durante toda la hora. Valores bastante menores que la unidad indican concentraciones de flujos máximos en períodos cortos dentro de la hora. (Ver figura 4).

Figura 4 Variación del volumen en la hora pico.



Fuente: Municipalidad de Guatemala. **Boletín de tránsito**. Año 1987. Pág. 3

2.4.2.2. Variación horaria del volumen

Las variaciones de los volúmenes de tránsito o lo largo de las horas del día, dependen del tipo de ruta, según las actividades que prevalezcan en ella, puesto que hay rutas de tipo agrícola, comercial, turístico, etc.

Por ejemplo, en las ciudades, en un día entre semana se tiene una variación típica que está en función de las actividades rutinarias de los usuarios. Así en la madrugada se comienza con bajos volúmenes, los cuales se incrementan hasta alcanzar cifras máximas entre las 7 y las 9:30.

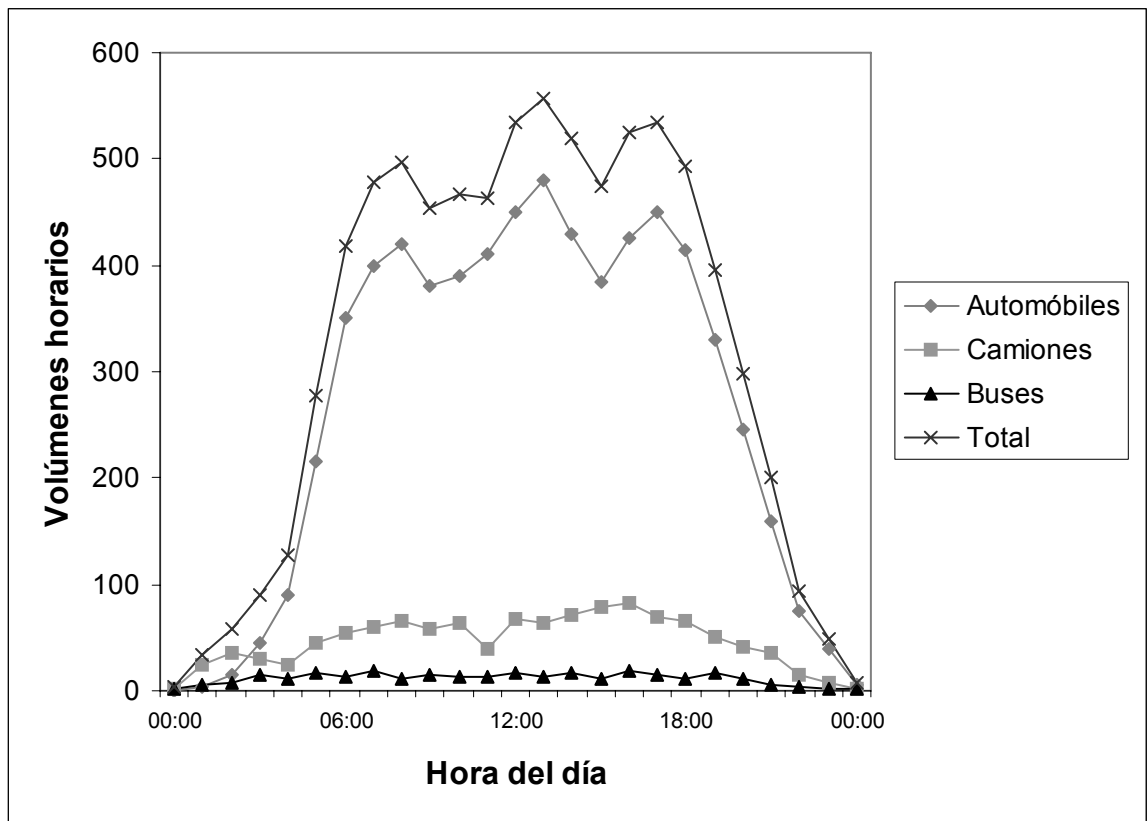
A partir de esta hora el tránsito tiende a bajar alrededor de medio día, hora en la que empieza a ascender para llegar algunas veces a otro máximo en horas tempranas de la tarde. Posteriormente, vuelve a

disminuir y más tarde se presenta un tercer valor máximo entre las 18 y las 20 horas.

De esta hora en adelante, baja gradualmente para alcanzar un valor mínimo en la madrugada.

Son variaciones horarias que ocurren en cualquier parte del mundo, que se pueden prever y cuantificar mediante los estudios necesarios; éstas se pueden apreciar en la figura 5.

Figura 5 Variación horaria del volumen.



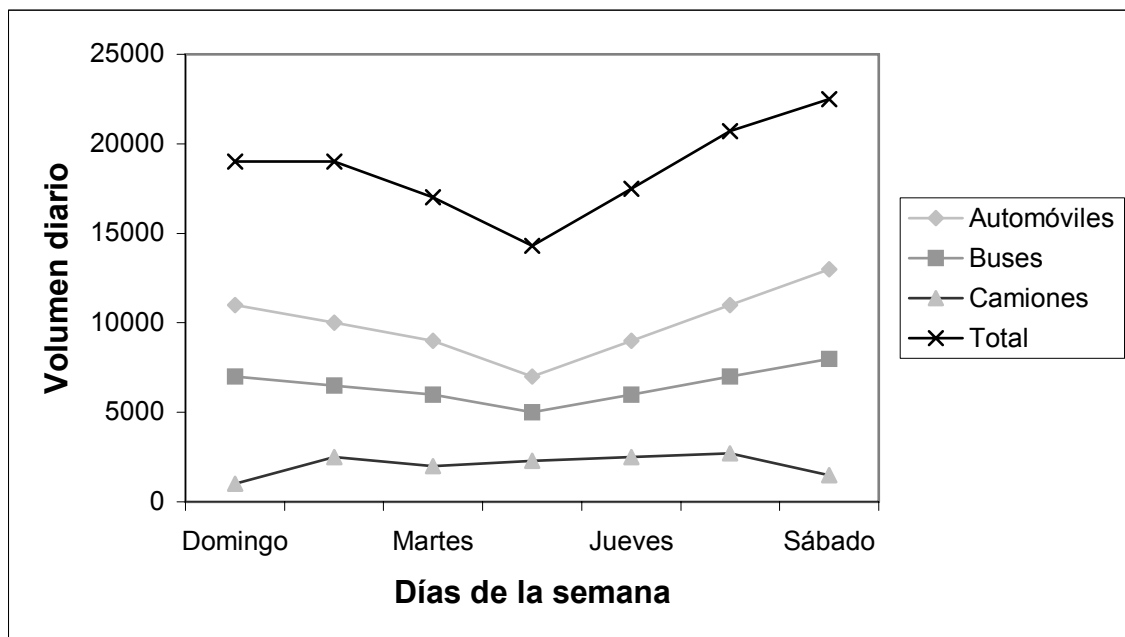
Fuente: Cal y Mayor *et al.* **Ingeniería de tránsito fundamentos y aplicaciones.** Pág. 170.

2.4.2.3. Variación diaria

Se ha estudiado cuáles son los días de la semana en que los volúmenes de tránsito se comportan de manera normal. Por ejemplo, en zonas urbanas, la variación de los volúmenes de tránsito diario no es muy pronunciada entre semana, es decir, que están más o menos distribuidos en los días laborales, sin embargo, los más altos volúmenes ocurren el viernes.

También vale la pena mencionar, con referencia a la variación diaria de los volúmenes de tránsito tanto a nivel urbano como rural, que se presentan máximos en aquellos días de eventos especiales como Semana Santa, fiestas de fin de año y competencias deportivas.

Figura 6 Variación diaria del volumen



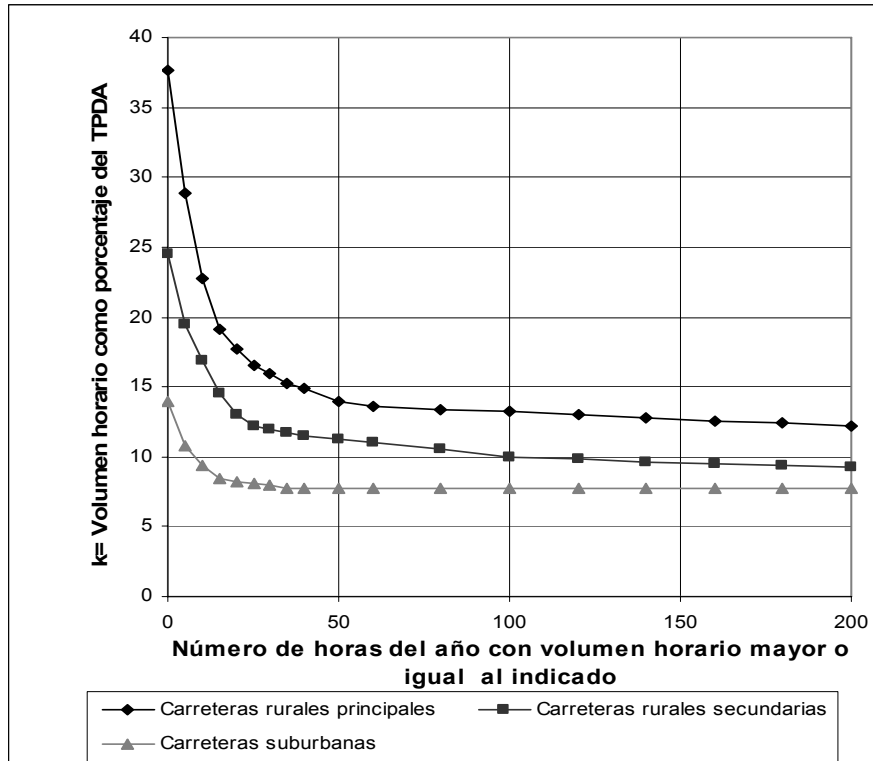
2.4.3. Estimación de volumen de tránsito futuro

2.4.3.1. Volumen horario de diseño

Si se hiciera una lista de los volúmenes de tránsito horario que se presentan en el año, en orden descendente, sería posible determinar los volúmenes de una hora específica de máximo volumen.

Para estimar el volumen horario de diseño, VHD, se utiliza como guía una curva que muestre la variación de los volúmenes de tránsito horario durante el año. Este gráfico tiene ordenados el volumen horario expresado como porcentaje del tránsito promedio diario y en las abscisas el número de horas del año que cuentan con volúmenes mayores o iguales que el volumen indicado, ver figura 7.

Figura 7 Relaciones entre volúmenes horarios más altos del año y TPDA.



Fuente: Cal y Mayor *et al.* **Ingeniería de tránsito.** Pág. 176

Esta curva indica que los volúmenes de tránsito horario en una carretera presentan una amplia distribución durante el año y que, en términos generales, la mayor parte del volumen de tránsito ocurre durante un número relativamente pequeño de horas.

Comúnmente se utiliza el volumen de la 30ª hora, estimado al futuro, para fines de diseño porque significa un ahorro considerable en el proyecto de la sección transversal. En ocasiones, quizá convenga considerar la 50ª hora de máximo volumen, como norma de proyecto, en condiciones de presupuesto muy limitados.

De acuerdo con lo anterior en los proyectos de carreteras, el volumen horario de diseño, VHD, para el año de proyectos en función del tránsito promedio diario anual, TPDA, se expresa como:

$$VHD = k(TPDA) \quad (2.4)$$

Donde:

VHD = volumen horario de diseño

k = valor esperado de la relación entre el volumen de la n^a hora máxima seleccionada y el TPDA del año de proyecto.

TPDA = tránsito promedio diario anual.

Si selecciona el volumen de 30^a hora como el de diseño, para proyecciones a años futuros en carreteras, se recomiendan los siguientes valores de k:

Para carreteras suburbanas: $k = 0.08$

Para carreteras rurales secundarias: $k = 0.12$

Para carreteras rurales principales: $k = 0.16$

2.4.3.2. Pronóstico del volumen de tránsito futuro sin un modelo

Cuando no se dispone de suficiente información para la estimación de volúmenes de tránsito futuro utilizando modelos de predicción, puede seguirse el siguiente procedimiento (13-83) :

2.4.3.2.1. Recolección de datos

La información mínima que debe buscarse es la que se enumera a continuación:

- Plano de ubicación del elemento vial que se analiza.
- Representación gráfica de la geometría actual del elemento vial (fotografía aérea, croquis).
- Recursos para determinar la tendencia de crecimiento del tránsito:
- Datos históricos de conteos de tránsito (el período ideal es de 10 años, es decir el año actual más 9 años anteriores, si no se dispone de esta información como mínimo se debe considerar un período de análisis de 5 años).
- Registro de ventas de combustibles.
- Plano del uso de la tierra actual en el área de influencia del proyecto.
- Factores de tránsito.
- Factor k30: este factor se obtiene de los conteos de tránsito de estaciones permanentes con entornos similares y volúmenes libres identificados dentro de la 200^a hora de mayor demanda. k30 representa los volúmenes de la 30^a hora más alta.

- Factor D30: este factor se deriva de la siguiente información:
- Conteos de tránsito de la estación permanente de la cual se obtuvo el factor k30.
- Conteo clasificado de tránsito por tipo de movimiento y tipo de vehículo en un período de 72 horas en un punto dentro de los límites del proyecto.
- Conteos de tránsito de una estación cercana al área de estudio.
- El factor T, se obtiene a partir de conteos clasificados en un período de 24 a 72 horas dentro de los límites del proyecto.
- Descripción del uso de la tierra actual y futuro para obtener una estimación del incremento de tránsito para el elemento vial en estudio.
- La versión más actualizada del **Manual de capacidad de carreteras** y el programa de computadora más relevante.
- Determinar el año de apertura y el de diseño.
- Datos históricos de población y de ventas de vehículos.

2.4.3.2.2. Establecer la tendencia del crecimiento del tránsito

Construir un gráfico de los datos históricos del TPDA (tránsito promedio diario anual) a una escala conveniente con los volúmenes del eje “y” y los años

de conteos en el eje “x” (se debe dejar suficiente espacio para los años futuros y para el crecimiento del tránsito).

Utilizar el análisis de regresión de mínimos cuadrados combinado con la representación gráfica de la tendencia del crecimiento del tránsito.

Si los datos históricos son insuficientes, se debe preparar un análisis similar con indicadores alternativos (datos históricos de venta de combustible, uso de la tierra y datos de crecimiento de la población y de ventas de vehículos).

2.4.3.2.3. Desarrollar una proyección preliminar

Utilizar una tendencia establecida empíricamente para calcular el volumen de tránsito del año de diseño.

Utilizar métodos gráficos para proyectar el volumen de tránsito de la tendencia histórica al año de diseño.

2.4.3.2.4. Revisar la razonabilidad del pronóstico

Si en el año de proyecto las características de diseño de la geometría y los controles de tránsito están firmemente establecidas se debe realizar un análisis de la capacidad futura de la sección de rodadura. (13-84)

Si el diseño es lo suficientemente flexible para satisfacer la demanda libre, puede pasar directamente al paso 3.

Revisar los cambios esperados en el uso de la tierra en la cercanía y determinar si el crecimiento de tránsito proyectado es consistente con el crecimiento estimado de la población, empleo u otras variables y hacer los ajustes respectivos.

2.4.3.2.5. Desarrollar el pronóstico del tránsito futuro en detalle

En el caso de intersecciones de vías, se debe utilizar los porcentajes diarios de movimientos de cruce para convertir los volúmenes asociados en el año futuro a pronósticos de movimientos de cruce. (13-85)

De otra manera se debe estimar en forma lógica los porcentajes de movimientos de cruce a partir de observaciones en otras intersecciones con entornos similares y/o programa de computadora especializado para calcular estos porcentajes utilizando los volúmenes de llegada. Note que los porcentajes observados de cruce son válidos para pronósticos de año futuro, solamente si el uso de la tierra y las características de la red vial permanecen constantes o si los cambios proyectados en estas características son proporcionales al patrón existente.

Revisar la consistencia de movimientos de cruce diarios con generadores especiales de tránsito y las características en la red vial en áreas vecinas.

Balancear los volúmenes de movimientos de cruce diarios ajustados para lograr simetría direccional. Una manera simple de hacer esto es sumar los movimientos de tránsito contrarios y dividirlos por dos.

Habr  algunas situaciones en que balancear los movimientos de la intersecci3n no sea lo apropiado.

Usar los factores k_{30} y D_{30} para desarrollar las proyecciones de tránsito horario en los períodos pico. Los pron3sticos matutinos y vespertinos, usualmente, involucran la inversi3n de la direcci3n de flujo máximo.

Revisar que los volúmenes horario de diseño matutino y vespertino sean consistentes con el patr3n de generaci3n de viajes del uso proyectado de la tierra en la cercanía y hacer los ajustes respectivos, si fuera necesario.

Dichos ajustes se hacen con referencia a diferencias observadas en ciertas características tales como el número de viajes y divisiones direccionales que ocurren durante los períodos pico de la mañana y de la tarde.

2.4.3.2.6. Revisi3n final y documentaci3n

Finalmente, se debe realizar un control de calidad para revisar la razonabilidad de las proyecciones con el cual se puede examinar las proyecciones de tránsito comparadas con los volúmenes de tránsito observados y tendencias hist3ricas, el mejoramiento eventual de las vías y proyecciones del uso de la tierra. Tambi3n se debe revisar que los datos de ingreso y los cálculos del pron3stico est3n correctos. Preparar la memoria de cálculo documentando los procedimientos, las suposiciones y los resultados.

2.4.3.3. Modelos de planificación para estimar el tránsito futuro

Para obtener estimativos confiables de los volúmenes vehiculares que circularán en el futuro, por vías alternas, se utilizan modelos de asignación de tránsito los cuales, a su vez, se estiman con modelos de demanda.

Éstos se calculan utilizando parámetros socioeconómicos (como la población total, la población económicamente activa, la población ocupada y los vehículos registrados) y las demandas actuales obtenidas a través de encuestas de origen y destino.

Por lo general, la asignación es de tipo probabilístico con base en una función de utilidad que toma en cuenta el tiempo de recorrido, las tarifas, los costos de operación, las características geométricas, y los volúmenes actuales y su composición. El pronóstico de los volúmenes de tránsito futuro en áreas urbanas, es mucho más complejo.

En el análisis de flujos vehiculares de redes de transporte, la primera fase del proceso consiste en un inventario, en el año base, de los recursos de transporte existentes y sus características; de los patrones de viajes determinados a través de encuestas de origen y destinos y aforos vehiculares; y de los factores de planificación como usos del suelo, distribución de los ingresos, estructura urbana y tipos de empleo. Igualmente, es necesario obtener información relacionada con el crecimiento de la población, el tamaño de la ciudad y los vehículos registrados.

La segunda fase tiene como propósito llevar los datos recolectados en la primera fase, a relaciones o fórmulas mediante el desarrollo de modelos.

El modelo de generación de viajes relaciona los viajes producidos (origen) y atraídos (destino) con los usos del suelo, la densidad de la población, la distribución del ingreso y el tipo de empleo.

El modelo de distribución de viajes, apoyado en fórmulas, describe cómo se distribuyen los viajes entre un origen y varios destinos de acuerdo con el grado de atracción de las diferentes zonas y el modelo de asignación de tránsito, que determina cómo se asignan los viajes entre sí sobre las diversas rutas entre cada origen y destino, incluyendo la elección de modos de viaje.

La tercera fase de los pronósticos o extrapolaciones, realiza predicciones sobre el uso futuro del suelo, la población etc., con base en el desarrollo histórico, estima la generación y distribución de viajes en el futuro.

La cuarta fase o final, asigna los viajes pronosticados, o futuros, a las rutas de la red de transporte que incluye nuevas vías. Se efectúan estudios económicos de costo-beneficio para evaluar las diferentes alternativas orientadas hacia la expansión del sistema vial y de transporte.

2.5. Modelos del flujo vehicular

Para cumplir con el objetivo de la optimación de la operación vehicular, el ingeniero de tránsito cuenta con expresiones matemáticas o modelos que han sido desarrollados a través de la investigación, a partir de la observación del

flujo de vehículos y que se utilizan para evaluar la efectividad de las innovaciones a un sistema vial.

Mediante el análisis de los elementos del flujo vehicular se pueden entender las características y el comportamiento del tránsito, requisitos básicos para el planeamiento, diseño y operación de carreteras, calles y obras complementarias dentro de un sistema de transporte.

Uno de los resultados más útiles del análisis es el desarrollo de los modelos que relacionan diferentes variables como el volumen, la velocidad y la densidad. Estas expresiones han sido base del desarrollo de los conceptos de capacidad y nivel de servicio.

Según sea la naturaleza de las funciones matemáticas que relacionan las variables del movimiento vehicular, se pueden clasificar en determinísticos y probabilísticos. Si se consideran los vehículos en forma individual, se denominan modelos microscópicos; si se toman colectivamente, macroscópicos.

2.5.1. Criterio de análisis de capacidad y nivel de servicio

En función del nivel de servicio estará el número de vehículos por unidad de tiempo que puede ser admitida por una vía, al cual se le denomina flujo de servicio. Este flujo va en aumento a medida que el nivel de servicio se deteriora, hasta llegar al nivel E, que es donde se alcanza la capacidad del tramo de calle o carretera. En condiciones más desfavorables, el flujo de servicio disminuye.

En los análisis de capacidad para identificar el nivel de servicio se utilizan como parámetros de comparación la velocidad media de recorrido además de la densidad para los casos de circulación continua y la demora en el caso de la circulación discontinua. En cualquiera de los casos un factor primordial para estimar el grado de utilización de un sistema vial, es la relación entre el flujo de servicio y la capacidad (v/c). La relación v/c también puede ser interpretada como la relación entre el flujo de demanda y la capacidad (oferta).

Debido a la complejidad del análisis de un sistema vial, se realizan estudios aislando cada una de sus partes como pueden ser un tramo de entrecruzamiento, rampas de acceso, intersecciones con o sin semáforos, etc.

Para cada elemento de sistema vial se han fijado factores numéricos determinados empíricamente la mayoría de las veces, que puede usarse para deducir matemáticamente la capacidad del segmento de vía.

En el **Manual de capacidad de carreteras 2000**, se detallan los procedimientos de los estudios de tránsito para cada componente de la infraestructura vial.

2.5.2 . Semáforos

Los semáforos modernos distribuyen tiempo en una amplia variedad de formas, desde la más simple que es de dos fases a tiempo fijo, a la más compleja de varias fases con control accionado por el tránsito. A continuación, se describe la terminología básica utilizada en la operación de los semáforos.

Ciclo

Es cualquier secuencia completa de las indicaciones del semáforo.

Longitud del ciclo

Es el tiempo necesario para una secuencia completa de todas las indicaciones de señal del semáforo, se expresa en segundos y se representa por el símbolo C.

Movimiento

Maniobra o conjunto de ellas de un mismo acceso que tienen el derecho de paso simultáneamente y forman una misma fila.

Fase

Parte del ciclo asignado a cualquier combinación de uno o más movimientos que reciben simultáneamente el derecho de paso, durante uno o más intervalos. Es la selección y ordenamiento de movimientos simultáneos.

Una fase puede significar un solo movimiento vehicular, un solo movimiento peatonal o una combinación de movimientos vehiculares y peatonales. Una fase comienza con la pérdida del derecho de paso de los movimientos que entran en conflicto con los que lo ganan. Un movimiento pierde el derecho de paso en el momento de aparecer la indicación amarilla.

Según la forma en que se manejen los movimientos vehiculares las fases pueden ser protegidas o permitidas. Son protegidas cuando los cruces a la izquierda o a la derecha no experimentan conflictos con movimientos opuestos, esto sucede cuando en el semáforo indica luz verde con una flecha para el movimiento de cruce, y son permitidas cuando el flujo de tránsito de cruce tiene que buscar brechas de paso entre las filas de vehículos opuestos.

Intervalo

Cualquiera de las divisiones del ciclo, durante la cual no cambia las indicaciones del semáforo.

Cambio de intervalo

Son los intervalos amarillo y todo rojo que ocurren entre fases para proveer el despeje de la intersección antes que sucedan movimientos conflictivos, se expresa en segundos y se le da el símbolo **Y**.

Tiempo de verde

Es el tiempo dentro de una fase durante el cual se muestra la indicación de luz verde, se representa por el símbolo **G_i** (para la fase *i*).

Tiempo perdido

Tiempo durante el cual la intersección no es utilizada en forma efectiva por ningún movimiento. Estos tiempos ocurren durante el cambio de intervalo (cuando la intersección es despejada), y al principio de cada fase donde los primeros vehículos formados en la cola experimentan demoras por inicio de marcha. Se le identifica por el símbolo **L**. (19-X.12)

Tiempo de verde efectivo

Es el tiempo dentro de una fase dada, que es efectivamente disponible para los movimientos permitidos. Generalmente, se toman como el tiempo de verde más el cambio de intervalo menos el tiempo perdido de la fase que se analiza; se expresa en segundos y se representa por el símbolo **gi** (para la figura i).

Relación de verde

Es la relación entre el verde efectivo y el ciclo, se representa por **gi/C** (para la fase i).

Rojo efectivo

Tiempo durante el cual un movimiento o serie de movimientos no son permitidos, se estima como la longitud del ciclo menos el tiempo de verde efectivo para una fase específica, se le da el símbolo **ri**.

La capacidad y la operación de la intersección regulada por semáforos se ven afectada por la distribución de la luz verde y por la manera en la cual los movimientos se acomodan dentro de una secuencia de fases. Se pueden

proporcionar señales para movimientos de vuelta que puede ser protegidos o permitidos.

Un movimiento de vuelta permitido es el que se lleva a cabo al mismo tiempo en que se desplazan flujos conflictivos que pueden ser, tanto peatonales como vehiculares. Las vueltas protegidas se realizan sin estos conflictos, debido a que se prohíben los movimientos que son adversos.

Para una situación en particular se puede elegir en cualquiera de las dos por ser más eficiente, pero para tomar esta decisión se deben contar los volúmenes, tanto de los que cruzan como los de movimientos opuestos, así como la geometría de la intersección y otros factores.

Los semáforos pueden operar en tres modos básicos que dependen del equipo de control que se disponga, los cuales se describen a continuación:

Operación de tiempo fijo

En ella la longitud de ciclo, fases, tiempos de verde y los cambios de intervalo son programados. Las señales se rotan en una modalidad constante, es decir, que los tiempos de cada parte de ciclo permanecen constantes.

Según sea el equipo disponible, se pueden utilizar varias series de operación ejecutadas automáticamente a horas fijas del día. En el medio guatemalteco solamente se trabaja con este tipo de operación.

Semáforos accionados por el tránsito

La característica principal de este tipo de semáforo es que la duración de los ciclos responde, en general, a las variaciones en la demanda del flujo vehicular. Dicha demanda es registrada por aparatos detectores conectados al control del semáforo.

Se especifican tiempos máximos y mínimos de verde, así como la secuencia de fases. Ciertas fases en el ciclo pueden ser opcionales y pueden ser salteadas por completo si no hay demanda registrada por los detectores.

Control semiaccionado

En este sistema de control el derecho de paso corresponde usualmente a la arteria principal y es transferido a la calle transversal de acuerdo con la demanda. La demanda es registrada por los detectores instalados en el o los accesos de las calles transversales.

En otros países se tiene el control de los sistemas de semáforos por computadoras. En ellos, las intersecciones individuales operan con la operación a tiempo fijo. La secuencia de fases y la coordinación con otros semáforos se selecciona y controla por medio de un computador central.

2.5.3. Análisis de capacidad y niveles de servicio en intersecciones con semáforo

La capacidad de una intersección es altamente dependiente de la secuencia de fases y de la distribución de tiempos programados. Por consiguiente, el significado de la capacidad de una intersección es un tanto

diferente del que se aplica para otros elementos de la infraestructura vial en los cuales rige, principalmente, su geometría y la velocidad de los vehículos.

Capacidad de intersecciones con semáforo

La capacidad en estos elementos viales se define para cada acceso, como la máxima tasa de flujo a la que puede pasar una corriente de tránsito a través de la intersección, en condiciones prevalecientes del tránsito, de la calle y del semáforo. (19_X.15).

Las condiciones del tránsito incluyen los volúmenes por tipo de movimiento (izquierda, directo, derecha), su composición vehicular, maniobras de estacionamiento, conflictos con movimientos peatonales y paradas de autobuses.

Las condiciones prevalecientes de la calle describen las características geométricas de los accesos en términos del número y ancho de carriles, pendientes y uso de carriles, incluso las áreas en donde se permite estacionar. Las condiciones del semáforo se refieren a la secuencia de fases, asignación de tiempos y el tipo de control utilizado.

Para el análisis de capacidad se debe calcular la relación de volumen a capacidad (v/c) para movimiento críticos en carriles aislados o en grupos de ellos en todo el acceso.

La relación se determina dividiendo para los 15 min. pico, el flujo actual o proyectado hacia el futuro del acceso o grupo de carriles entre su capacidad c . Para determinar la capacidad de un grupo de carriles se utiliza el siguiente concepto:

Flujo de saturación (s)

Se define como la máxima tasa de flujo, en un acceso o grupo de carriles, que pueden pasar a través de la intersección en las condiciones del tránsito y de la calle, suponiendo que dicho acceso tiene el 100% del tiempo disponible como verde efectivo. Se expresa en vehículos por hora de luz verde (vphv). (19-XVI.9)

La capacidad de un acceso o de un grupo de carriles se define por:

$$c_j = s_j * g_i \quad (2.5)$$

Donde:

- ci = capacidad del acceso o grupo de carriles i
- sí = flujo de saturación del acceso para el acceso i (vphv)
- gi = tiempo de verde efectivo para el acceso i (seg.)
- C = ciclo del semáforo (seg.)
- gi/C = relación de verde para el acceso o grupo de carriles i.

Grado de saturación (X)

Se llama así a la relación v/c del acceso o grupos de carriles i. Se expresan como:

$$X_i = \frac{(v/s)_i}{(g/C)_i} \quad (2.6)$$

En esta última expresión, al cociente de (v/s)_i se le denomina relación de flujo. Los valores de X_i están dentro del rango de 1.0 cuando el flujo es igual a la capacidad y 0.0 cuando la tasa de flujo es cero. (19-XVI.14)

Para evaluar globalmente la intersección, con respecto a su geometría y al ciclo, se utiliza el siguiente concepto:

Grado de saturación crítico (X_c)

Se considera únicamente a los accesos o grupos de carriles críticos, que son aquellos que tienen la relación de flujo más alta para cada fase, $(v/s)_{ci}$. Se define como (19-XVI.14):

$$X_c = \sum_i (v/s)_{ci} * \frac{C}{C-L} \quad (2.7)$$

Donde

$\Sigma(v/s)_{ci}$ = suma de las relaciones de flujo de todos los accesos o grupos de carriles críticos i .

C = ciclo (seg.)

L = tiempo perdido por ciclo (seg.)

Niveles de servicio en intersecciones con semáforo

El nivel de servicio de una intersección con semáforo se establece en término de las demoras, las cuales representan para el usuario una medida del tiempo perdido de viaje, del consumo de combustible, de la incomodidad y de la frustración. Específicamente, el nivel de servicio se expresa en términos de la demora media por vehículos en un período de análisis de 15 minutos. (19-X.15)

Se definen seis niveles de servicio cuyas características principales son:

Nivel de servicio A

Operación con demoras muy bajas, menores o iguales a 10 segundos por vehículo. La mayoría de los vehículos llegan durante la fase verde y no se detienen del todo. Longitudes de ciclo cortas pueden contribuir a demoras mínimas.

Nivel de servicio B

Describe la operación con demoras entre 10 y 20 segundos por vehículo. Algunos vehículos comienzan a detenerse.

Nivel de servicio C

Se tienen demoras en el rango entre 20 y 35 segundos por vehículo. Estos valores de demora pueden resultar de la progresión del tránsito regular y/o longitudes de ciclo más largas.

Se empiezan a presentar algunos ciclos con fallas de operación. El número de vehículos que se detienen es significativo, aunque muchos pasan por la intersección sin parar.

Nivel de servicio D

Operación con demora entre 35 y 55 segundos por vehículo. Es posible que las demoras se deban a la mala progresión del tránsito o llegadas en la fase roja, longitudes de ciclo amplias, o relaciones v/c muy altas. Muchos vehículos se detienen los ciclos con fallas son más evidentes.

Nivel de servicio E

Describe la operación con demoras en el rango de 55 a 80 segundos por vehículo. Se considera como el límite aceptable de demoras. Las demoras son causadas por progresiones pobres, ciclos muy largos y relaciones v/c altas.

Nivel de servicio F

Operaciones con demoras superiores a los 80 segundos por vehículo. Los flujos de llegada exceden la capacidad de la intersección, lo que ocasiona congestión y operación saturada.

Tabla I Niveles de servicio en intersecciones con semáforo

NIVEL DE SERVICIO	DEMORA POR VEHÍCULO (seg.)
A	≤ 10
B	10 - 20
C	20 - 35
D	35 - 55
E	55 - 80
F	> 80

Fuente: Transportation Research Board. *Highway Capacity Manual*. Pág. 16-22.

2.5.4. Metodología del análisis operacional de intersecciones con semáforo

Mediante este análisis, se determina la capacidad y el nivel de servicio de cada acceso o grupo de carriles, así como el nivel de servicio de la intersección considerada en forma global. Debido a la complejidad del análisis, los procedimientos se dividen en seis módulos:

- Módulo de entrada
- Módulo de ajustes de volúmenes
- Módulo de flujo de saturación
- Módulo de análisis de capacidad
- Módulo de nivel de servicio
- Módulo extensión promedio de cola

2.5.4.1. Módulo de entrada

La información que se necesita para iniciar un análisis de capacidad, se clasifica en las siguientes categorías:

Condiciones geométricas

Se presentan en forma diagramática todas las características físicas de la intersección, en la que se debe incluir el número y ancho de carriles, movimientos por carril, ubicación de estacionamientos, pendientes de los accesos y longitudes de bahías para vueltas.

Condiciones del tránsito

Se debe disponer de los volúmenes del tránsito para cada movimiento en cada acceso y la composición del tránsito en función de automóviles, buses y camiones. De éste último, se determina el porcentaje de vehículos pesados (% VP), se considera como vehículo pesado todo aquel que tenga más de cuatro ruedas en contacto con el pavimento.

Se identifica el número de buses que realizan paradas para carga y/o descarga de pasajeros en el área cercana a la intersección, los que no paran se consideran como vehículos pesados. A su vez, debe haber un aforo para los flujos peatonales y de bicicletas que entran en conflicto con los vehículos.

Finalmente, se deben definir el tipo de llegadas de los accesos de la intersección. Ésta es una de las características más críticas del tránsito y se clasifica en las cinco categorías siguientes:

- Tipo 1

Esta condición se define para un grupo de vehículos denso que llega a la intersección al inicio de la fase roja. Representa la peor condición de grupo. Los semáforos son espaciados menos de 500 m. entre sí.

- Tipo 2

Se considera que puede ser un grupo denso llegado a mitad de la fase roja o un grupo disperso que llega a lo largo de toda la fase roja. Esta condición también es desfavorable. Los semáforos están espaciados entre 500 y 1000 m.

- Tipo 3

Es representada por aproximaciones totalmente aleatorias. Sucede cuando se tiene una amplia dispersión de vehículos a través de la fase roja y verde y/o cuando el acceso está totalmente descoordinado con otros semáforos, ya sea porque es una intersección aislada o porque los semáforos cercanos operan en diferentes longitudes de ciclo. El espaciamiento entre semáforos es mayor de 1000 m. Ésta es una condición promedio.

- Tipo 4

Esta condición se define para grupos densos que llegan a mitad de la fase verde, o grupos dispersos que llegan en toda la fase verde. Se clasifica como condición moderada. Los semáforos están espaciados entre 500 y 1000 m entre sí.

- Tipo 5

Se define para grupos densos que se aproximan a la intersección al inicio de la fase verde. La distancia entre semáforos es menor de 500 m. Es la condición de grupo más favorable.

- Tipo 6

Es la condición excepcional en la que ningún vehículo experimenta demora. Típico de calles de un solo sentido en redes densas y en zonas centrales de negocios. El espaciamiento de semáforos es menor de 250 m.

Los tipos de llegada se determinan de mejor manera por observación directa en el campo, pero también pueden estimarse en forma aproximada al examinar diagramas de espacio tiempo para el acceso que se evalúa. Se debe tener cuidado en su estimación, porque es un parámetro significativo en cálculos posteriores.

Aunque no hay parámetros definitivos para cuantificar precisamente el tipo de llegada, la siguiente relación proporciona valores útiles:

$$R_p = \frac{PVG}{PCV} \quad (2.8)$$

Donde:

R_p = relación de grupo

PVG = porcentaje de todos los vehículos en el movimiento que llegan durante la fase verde.

PCV = porcentaje del ciclo que es verde en el movimiento, $PCV = G/C \cdot 100$.

Tabla II tipo de llegada correspondiente a la relación de grupo

TIPO DE LLEGADA A LA INTERSECCIÓN	RANGO DE LA RELACIÓN DE VEHÍCULOS AGRUPADOS, R_p	VALOR REPRESENTATIVO	CALIDAD DEL AVANCE
1	≤ 0.50	0.333	Muy pobre
2	$>0.50 - 0.85$	0.667	Desfavorable
3	$>0.85 - 1.15$	1.000	Llegadas aleatorias
4	$>1.15 - 1.50$	1.333	Favorable
5	$>1.50 - 2.00$	1.667	Muy favorable
6	>2.00	2.000	Excepcional

Fuente: Transportation Research Board. *Highway Capacity Manual 2000*. Pág. 16-26.

Condiciones del semáforo

Para efectuar el análisis de capacidad es necesario conocer o estimar la longitud del ciclo, los tiempos de verde, de cambio de intervalo y de despeje de la intersección. Se debe elaborar un diagrama de la sucesión de las fases.

En el caso de tener cruce de peatones, se debe comprobar que hay suficiente tiempo para que los movimientos peatonales se realicen con

seguridad. El tiempo mínimo de verde para una fase dada se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$G_p = 3.2 + \frac{L}{S_p} + 0.81 * \frac{N_{peat}}{W_E} \quad \text{para } W_E > 3.0 \quad (2.9)$$

$$G_p = 3.2 + \frac{L}{S_p} + 0.27 * N_{peat} \quad \text{para } W_E \leq 3.0 \quad (2.10)$$

Donde:

- G_p = tiempo verde mínimo (s)
- L = longitud de cruce (m)
- S_p = velocidad promedio de peatones (m/s)
- N_{peat} = número de peatones que cruzan durante el intervalo (p)
- W_E = ancho efectivo de calzada
- 3.2 = tiempo para inicio de marcha de peatones (s)

Se asume que el 15^a percentil de la velocidad a que camina un peatón es de 1.2 m/s, en éste valor se considera también a aquellas personas que caminan más lento que el promedio. A continuación, se presentan valores de variables cuando no se dispongan de datos de campo.

Tabla III Valores variables en condiciones ideales

PARAMETRO	VALOR
Ancho de carril	3.60 M
Tipo de llegada a la intersección	3
Flujo peatonal conflictivo (peatones/horas)	Flujo bajo 50 Flujo medio 200 Flujo alto 400
Porcentaje de vehículos pesados, % VP	2%
Factor de hora pico	0.92
Pendiente	0%
Número de buses, Nb	0
Número de maniobras de parqueo por hora, Nm	20
Tipo de llegada	3

Fuente: Transportation Research Board. *Highway Capacity Manual 2000*. Pág. X.17

2.5.4.2. Módulo de ajuste de volúmenes

En este módulo de análisis, sigue el procedimiento que se describe a continuación:

Expresar los volúmenes horarios como tasas de flujo para un período de análisis de 15 minutos, ya que dentro del lapso de una hora se pueden presentar volúmenes más altos que el promedio. Para reflejar esta situación, se utiliza la siguiente expresión:

$$V_p = \frac{V}{FHP} \quad (2.11)$$

VP = tasa de flujo durante 15 minutos de máxima demanda.

V = volumen horario (vph).

FHP = factor de hora pico.

Debido a que no todos los movimientos de la intersección presentan su demanda máxima al mismo tiempo, es deseable medir los flujos de 15 minutos directamente y seleccionar los períodos críticos para su análisis.

La metodología del **Manual de capacidad de carreteras** se basa en el estudio de los movimientos vehiculares, considera de manera individual los accesos de la intersección y los grupos de carriles, dentro de los mismos. Se llama grupo de carriles, cuando uno más carriles en un acceso de una intersección sirve para uno o más movimientos del tránsito.

La división de la intersección en grupos de carriles es una tarea relativamente sencilla en la que se considera, tanto la geometría como la distribución de los movimientos del tránsito. A continuación se mencionan algunos lineamientos generales:

- Un carril de cruce exclusivo a la derecha o a la izquierda se considera en un solo grupo por separado, a menos que el carril sea compartido para seguir de frente y cruzar.
- En accesos con carriles exclusivos de cruce, el resto de movimientos se reúne en un solo grupo.
- En un acceso de más de un carril en el que se presentan movimientos para seguir de frente y de cruce a la izquierda en un carril cualquiera, se debe determinar si estos movimientos son equilibrados o son predominantes los giros a la izquierda. En este último caso se considera como un carril exclusivo de cruce a la izquierda.

2.5.4.3. Módulo de flujo de saturación

La tasa de flujo de saturación, como ya se definió anteriormente, es el flujo expresado en vehículos por hora que puede ser alojado por el grupo de carriles; se asume que la relación de verde g/C , es igual a la unidad.

En este módulo, se calcula un flujo de saturación por cada grupo de carriles. Para su estimación, se parte del valor del flujo de saturación en condiciones ideales, cuyo valor se toma generalmente de 1,900 vehículos livianos por hora de luz verde por carril (vlphvpc) y se hacen ajustes por medio de factores de corrección cuando las condiciones predominantes de la intersección son diferentes de las ideales. Para su cálculo se utiliza la siguiente expresión:

$$s = s_o * N * (f_A * f_{VP} * f_g * f_{bb} * f_{TI} * f_{UC} * f_{VD} * f_{VI} * f_{Dbp} * f_{lbp}) \quad (2.12)$$

Donde:

- s = flujo de saturación del grupo de carriles, expresado como el total para todos los carriles del grupo, en condiciones predominantes (VHP).
- s_o = flujo de saturación ideal, se recomienda el valor de 1,900 vphcpc.
- N = número de carriles.
- f_A = factor de ajuste por ancho de carril.
- f_{VP} = factor de ajuste por vehículo pesado.
- f_g = factor de ajuste por pendiente de acceso.
- f_E = factor de ajuste por estacionamiento.
- f_{bb} = factor de ajuste por parada de autobuses.
- f_{UC} = factor de ajuste de utilización de carril
- f_{TI} = factor de ajuste por tipo de área de la intersección.

f_{VD} = factor de ajuste por vueltas a la derecha en el grupo de carriles.

f_{VI} = factor de ajuste por vueltas a la izquierda en el grupo de carriles.

f_{Dpb} = factor de ajuste de peatones o bicicletas para movimientos a la derecha

f_{Ipb} = factor de ajuste de peatones o bicicletas para movimientos a la izquierda

La tasa de saturación ideal también puede medirse directamente en el campo, en el capítulo 3 se hace una descripción de los procedimientos de campo para poder determinarla.

Si una condición de la intersección es ideal, su correspondiente corrección es igual a la unidad. Cada factor de ajuste refleja el impacto en las condiciones predominantes de la intersección, cuando éstas son diferentes a las ideales.

2.5.4.3.1. Ajuste por ancho de carril

El factor por ancho de carril, f_A , informa el efecto nocivo de carriles estrechos en la circulación vehicular, así como el aumento en el flujo en carriles anchos. El ancho estándar de un carril se toma como de 3.60 m y se pueden hacer los ajustes a carriles de hasta 4.80 m. Para carriles mayores de este ancho se recomienda hacer el análisis de dos o más carriles.

$$f_A = 1 + \left(\frac{W - 3.60}{9} \right) \text{ para } 2.4 \leq W < 4.80 \quad (2.13)$$

En la cual W representa el ancho del carril.

2.5.4.3.2. Ajuste por vehículos pesados

La corrección por vehículo pesado (f_{VP}), es necesaria para medir el impacto de la circulación de ese tipo de vehículos, ya que no sólo ocupan más espacio sino que sus capacidades de operación son menores que las de los automóviles. Un vehículo pesado es aquel que tiene más de cuatro neumáticos en contacto con el pavimento. En la fórmula para determinar este factor, %VP es el porcentaje de vehículos pesados en el grupo de carriles y cada vehículo pesado se considera que es equivalente a dos carros de pasajeros. (19-XVI.10)

$$f_{VP} = \frac{100}{100 + \%VP * (E_T - 1)} \quad (2.14)$$

$E_T=2.0$ carros de pasajeros/ vehículo pesado

2.5.4.3.3. Ajuste por pendiente del acceso

El factor por pendiente del acceso (f_G) hace notar los cambios en la operación vehicular debido a las cuestas y bajadas. La convención de signos es positiva para las cuestas y negativo para las bajadas. (19-XVI.10)

$$f_G = 1 - \frac{\%G}{200} \quad (2.15)$$

%G representa el porcentaje de pendiente del acceso y esta fórmula es válida para $-6 < G < +10$.

2.5.4.3.4. Ajuste por parqueo

El factor de ajuste por parqueo, f_p , cuenta los efectos friccionantes de un carril de parqueos en el flujo en un grupo de carriles adyacentes tal como el bloqueo ocasional de un carril adyacente por vehículos que entran y salen de los espacios disponibles para parqueo. Cada maniobra se asume que bloquea el tránsito en el carril contiguo al parqueo por un lapso promedio de 18 segundos.

El número de maniobras por hora en áreas de parqueo que estén dentro de una distancia de 75 m es a partir de la línea de alto en sentido contrario a la intersección. Si se observan en el campo más de 180 maniobras por hora, se establece este valor como un límite práctico.

En la fórmula para calcular el ajuste por parqueo debe notarse que existe diferencia entre situaciones donde no se produce parqueo que en condiciones con cero maniobras. (19-XVI.10)

$$f_p = \frac{N - 0.1 - \frac{18 * N_m}{3600}}{N} \quad 0 \leq N_m < 180, \quad f_p \geq 0.05 \quad (2.16)$$

Donde

f_p = factor de ajuste por parqueo

N = número de carriles del grupo

N_m = número de maniobras por hora

F_p = 1.000 para condiciones de no parqueo

2.5.4.3.5. Ajuste por bloqueo de buses

El factor de ajuste por bloqueo de buses, f_{bb} , toma en cuenta el impacto de autobuses que hacen paradas para carga o descarga de pasajeros dentro de una distancia de 75 m a partir de la línea de alto, ya sea en el sentido del tránsito o en sentido contrario.

Este factor debe usarse únicamente cuando los buses bloquean el flujo del tránsito en el grupo de carriles. El límite de este factor se restringe a 250 buses por hora y se asume que el tiempo promedio de bloqueo es de 14.4 dentro de la luz verde del semáforo. (19-XVI.10)

$$f_{bb} = \frac{N - \frac{14.4 * N_b}{3600}}{N} \quad 0 \leq N_b \leq 250, \quad f_{bb} \geq 0.05 \quad (2.17)$$

Donde

F_{bb} = factor de ajuste por bloqueo de buses

N = número de carriles del grupo

N_b = número de buses que paran por hora

2.5.4.3.6. Ajuste por tipo de área

El factor por ubicación, f_{TI} , hace notar la relativa ineficiencia del flujo cuando el cruce de vías está localizado en un área comercial en comparación con otras áreas, esto se debe a la complejidad y congestionamiento general de estos sitios. Las áreas comerciales se caracterizan por tener estrechos derechos de vía, muchas paradas de taxis y autobuses así como un fuerte flujo peatonal. Este factor solo presenta dos valores posibles (19-XVI.12):

$f_{T1} = 0.90$ áreas comerciales

$f_{T1} = 1.00$ otras áreas

2.5.4.3.7. Ajuste por utilización del carril

El factor de ajuste por utilización del carril, f_{UC} , toma en cuenta la distribución desigual de tránsito dentro de los grupos de carriles formados por más de un carril. Se basa en el flujo vehicular del carril con el volumen más alto y se calcula mediante la ecuación (19-XVI.12):

$$f_{UC} = \frac{v_g}{v_{g1} * N} \quad (2.18)$$

Donde:

f_{uc} = factor de ajuste por utilización del carril

v_g = tasa de flujo del grupo de carriles sin ajustar (veh/h)

V_{g1} = tasa de flujo del carril de mayor volumen sin ajustar (veh/h)

N = número de carriles que forman el grupo

Este ajuste es normalmente aplicado para contar la variación del flujo de tránsito en carriles individuales en un grupo debido a las características de la vía en sentido del tránsito o en sentido contrario; tales como cambios en el número disponible de carriles. También cuenta el posicionamiento del tránsito dentro del grupo de carriles previo a realizarse los movimientos de cruce.

Cuando se asume que todos los carriles del grupo tienen volúmenes similares el factor de ajuste por uso de carril toma el valor de 1.00.

2.5.4.3.8. Factor de ajuste vuelta a la derecha

Los factores de ajuste de cruce a la derecha, f_{gD} , están destinados principalmente para reflejar el efecto de la geometría. Un factor separado de bloque de peatones y bicicletas es usado para reflejar los efectos de estos conflictos. (19-XVI.13)

El factor de cruce a la derecha depende de ciertas variables que incluyen:

- Si el cruce a la derecha se hace desde un carril exclusivo o compartido y,
- La proporción de vehículos que dan vuelta a la derecha en los carriles compartidos.

El factor de vuelta a la derecha toma el valor de 1.00 si el grupo de carriles no incluye ningún giro a la derecha.

En los casos en que se permite el cruce a la derecha con el semáforo en rojo, el volumen de giro a la derecha debe reducirse del volumen del grupo.

Carril exclusivo

$$f_{VD} = 0.85$$

Carril compartido

$$f_{VD} = 1.0 - 0.15 * P_{VD}$$

Un solo carril

$$f_{VD} = 1.0 - 0.135 * P_{VD}$$

P_{VD} = proporción de vehículos que dan vuelta a la derecha

$$f_{VD} \geq 0.05$$

2.5.3.9. Ajuste para cruces a la izquierda

Este factor, simbolizado por f_{GI} , está basado en variables similares al factor de giro a la derecha, dentro de las que se incluyen:

- Si el giro a la derecha se efectúa en carriles exclusivos o compartidos.
- Tipo de fases (protegidos, permitidos o la combinación de éstas).
- La proporción de vehículos que hacen el cruce a la derecha en grupos de carriles compartidos.
- La tasa de flujo del movimiento opuesto cuando se efectúan los giros a la izquierda.

Este factor se aplica en 6 casos diferentes de fases de giro a la izquierda, que son:

- Caso 1 carril exclusivo con fase protegida
- Caso 2 carril exclusivo con fase permitida
- Caso 3 carril exclusivo con fase combinada protegida y permitida
- Caso 4 carril compartido con fase protegida
- Caso 5 carril compartido con fase permitida
- Caso 6 carril compartido con fase combinada protegida y permitida

Carril exclusivo

$$f_{VI} = 0.95$$

Carril compartido

$$f_{VI} = \frac{1}{1 + 0.05P_{VI}}$$

P_{VI} = proporción de vehículos que dan vuelta a la izquierda

Existe un procedimiento para determinar los factores de ajuste por vuelta a la izquierda en los casos que se tienen fases no protegidas, sin embargo se considera que su descripción se sale de los objetivos perseguidos en el presente trabajo de graduación. Para el lector que esté interesado en conocer este procedimiento se le recomienda consultar el apéndice 16C del **Manual de Capacidad de Carreteras**, versión 2000.

2.5.4.3.10. Factores de ajuste por bloqueo de peatones o bicicletas

El procedimiento para determinar el factor de ajuste por bloqueo de peatones o bicicletas para movimientos a la izquierda, f_{bpI} y para movimientos a la derecha f_{bpD} , consiste en cuatro pasos.

El primer paso es delimitar el espacio ocupado por los peatones. Luego se establecen las zonas relevantes donde ocurren los conflictos tanto de peatones como de bicicletas, en esta zona también se toma en cuenta si otros movimientos vehiculares también entran en conflicto. En cualquiera de estos casos se hacen ajustes a la ocupación inicial.

La proporción del tiempo de verde en la cual la zona de conflicto es ocupada se determina como una función de la ocupación relevante y el número de carriles para los vehículos que hacen giros.

La proporción de vueltas a la derecha usando la porción protegida de una fase combinada protegida+permitida también es necesaria que sea determinada. Dicha proporción debe ser estimada por observaciones de campo, pero puede ser estimada a grandes rasgos a partir de los tiempos del semáforo, asumiendo que la proporción de vueltas a la derecha usando la fase

protegida es, aproximadamente, igual a la proporción de tiempo en que la fase es protegida.

Si $P_{RTA}=1.00$ (esto es si los giros a la derecha están completamente protegidos de los conflictos con los peatones), se debe utilizar un volumen peatonal igual a cero. Finalmente, el factor de ajuste para el flujo de saturación se calcula con la ocupación final en base al estado de la protección del movimiento de giro y el porcentaje de vehículos que hace este tipo de movimiento en el grupo de carriles.

En el apéndice “D” del capítulo 16 del **Manual de capacidad de carreteras** se establece un procedimiento para el cálculo de este factor.

2.5.4.4. Módulo de análisis de capacidad

Los resultados obtenidos en los módulos anteriores se utilizan para determinar las variables por las que se calcula la capacidad. En éstas se incluyen la tasa de flujo, capacidad y grado de saturación para cada grupo de carriles así como el grado de saturación crítico para toda la intersección. (19-XVI.14)

Las tasas de flujo se estiman al dividir los flujos de demanda, v , que fueron determinados en módulo de ajuste de volúmenes entre la tasa de flujo de saturación, precisada en su respectivo módulo. La capacidad de cada grupo de carriles se calcula por medio de la siguiente expresión:

$$c_i = s_i * \left(\frac{g_i}{C} \right) \quad (2.19)$$

El grado de saturación (relación v/c) se obtiene directamente de:

$$X_i = \frac{v_i}{c_i} \quad (2.20)$$

Esta relación indica la proporción de la capacidad disponible, la cual es utilizada por los vehículos que se mueven en carriles críticos, si resulta mayor que la unidad, significa que uno o más de los carriles están sobresaturados.

Esto refleja que el diseño de la intersección, duración del ciclo, la sucesión de fases y/o los tiempos de cada señal son inadecuados para las demandas existentes o proyectadas. Cuando la división de fases no es proporcional, algunas demandas de movimiento pueden exceder la capacidad aunque la relación v/c crítica sea menor que 1.00.

Grupos de carriles críticos

Otro concepto utilizado para analizar intersecciones con semáforo es la relación crítica de v/c, X_c . Éste es la relación v/c para toda la intersección, considerando solamente los grupos de carriles que tienen la relación de flujo más alto para una fase del semáforo dada.

Por ejemplo, con un semáforo de dos fases, los grupos de carriles opuestos se mueven durante el mismo tiempo de verde.

Generalmente, uno de estos dos grupos de carriles requerirá mayor tiempo de verde que la otra (ya que tendrá mayor relación de flujo). Éste sería el grupo de carriles crítico para esa fase del semáforo. Cada fase del semáforo

tendrá un grupo de carriles crítico que determina los requerimientos del tiempo de verde para la fase.

Cuando las fases de semáforo se traslapan, la identificación de esos grupos de carriles críticos puede ser algo compleja. La relación crítica v/c para la intersección es determinada por la ecuación 2.21.

El grado crítico de saturación para toda la intersección es:

$$X_c = \sum_i \left(\frac{v}{s} \right)_{ci} * \frac{C}{C-L} \quad (2.21)$$

Donde:

X_c = relación crítica v/c para la intersección.

$\sum (v/s)_i$ = sumatoria de las relaciones de flujo para todos los grupos de carriles i.

C = longitud del ciclo (s).

L = tiempo perdido total por ciclo, calculado como tiempo perdido, t_L , para el camino crítico de los movimientos (s).

La ecuación anterior es útil para evaluar globalmente la intersección con respecto a la geometría y la longitud total del ciclo y también en estimar tiempos del semáforo cuando son desconocidos o no son especificados por las políticas locales o procedimientos.

Esto da la relación v/c para todos los movimientos críticos, se asume que el tiempo de verde ha sido estimado en proporción a los valores de v/s. Las relaciones de flujo son calculadas al dividir el flujo de demanda ajustado, v, calculado en su módulo respectivo por la tasa ajustada del flujo de saturación, s.

Si los tiempos del semáforo no son conocidos se tiene que asumir o estimar un plan de fases para realizar estos cálculos. La relación v/c para cada grupo de carriles se calcula directamente al dividir los flujos ajustados por las capacidades determinadas por la ecuación (2.20).

Es posible tener una relación v/c menor que 1.0 y siempre tener movimientos individuales sobresaturados dentro del ciclo del semáforo. Cuando v/c es menor que la unidad es indicativo que todos los movimientos en la intersección pueden ser acomodados dentro de la longitud de ciclo definida y la secuencia de fases debe distribuir proporcionalmente los tiempos de verde.

2.5.4.5. Módulo de nivel de servicio

El nivel de servicio para cada grupo de carriles, para cada acceso y para toda intersección se define a través de la demora promedio por vehículo.

Los valores derivados del cálculo de la demora representan la demora promedio debido al control del semáforo que experimentan todos los vehículos que llegan durante el período de análisis, incluyendo las demoras que se producen después del período de análisis cuando el grupo de carriles está sobresaturado.

La demora por control incluye los movimientos a velocidades bajas en los accesos de la intersección a medida que los vehículos se forman en la cola o disminuyen su marcha para detenerse.

La demora promedio por control por vehículo está dada por la ecuación 2.22. También se puede determinar la demora al medirla directamente en campo.

$$d = d_1 * PF + d_2 + d_3 \quad (2.22)$$

Donde:

d = demora por control del semáforo por vehículo (s/veh).

d_1 = demora uniforme asumiendo llegadas uniformes (s/veh).

PF = factor de ajuste de la progresión de la demora uniforme, el cual representa los efectos de la progresión de los vehículos en el semáforo.

d_2 = incremento de la demora para tomar en cuenta el efecto de las llegadas aleatorias y colas sobrecargadas, el ajuste por la duración del período de análisis y tipo del control del semáforo; este componente de la demora asume que no hay una cola al inicio del período de análisis (s/Veh).

d_3 = demora de cola inicial, el cual toma en cuenta la demora de todos los períodos de análisis debido a la presencia de una cola al inicio del período de análisis (s/veh).

Factor de ajuste por progresión (PF)

Este factor refleja el avance de los vehículos que llegan al semáforo durante la fase verde, esta progresión afecta principalmente la demora uniforme y por esta razón solamente se aplica a d_1 . El valor de PF se puede determinar al utilizar la siguiente ecuación:

$$PF = \frac{(1-P)f_{PA}}{1 - \left(\frac{g}{C}\right)} \quad (2.23)$$

Donde:

PF = factor de ajuste por progresión.

P = proporción de vehículos que llegan durante el verde.

g/C = la porción de tiempo de verde disponible.

f_{PA} = factor de ajuste suplementario para llegadas en grupos de vehículos (pelotón) que llegan durante el verde.

El valor de P puede ser medido directamente en el campo o ser estimado por el tipo de llegada. Si se lleva a cabo una medición de campo, P debe ser determinado como la proporción de vehículos en el ciclo que llega a la línea de alto o se une a la cola (estacionaria o en movimiento) mientras se muestra el verde en el semáforo.

Los rangos aproximados de R_p son relacionados con el tipo de llegada como se muestra en la tabla II y los valores iniciales se sugieren para uso subsiguiente en los cálculos se muestran en la tabla IV.

Tabla IV Valores del factor de progresión según la relación g/C y el tipo de llegada

g/C	AT1	AT2	AT3	AT4	AT5	AT6
0.20	1.167	1.007	1.000	1.000	0.833	0.75
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	1.000	1.15	1.000	1.000
Rp por defecto	0.333	0.667	1.000	1.333	1.667	2.000

Fuente: Transportation Research Board. *Highway Capacity Manual*. Pág. XVI.144

$P = R_p * g / C$ (no debe de exceder de 1.00)

PF no debe de exceder de 1.00 para llegadas de tipo 3 a tipo 6.

Por razones prácticas este factor debe limitarse a un máximo de 1.0, en caso que se determine mediante la fórmula para llegadas tipo AT4 a AT6.

Demora uniforme

La ecuación (2.24) da una estimado de la demora asume llegadas uniformes, un flujo estable y sin colas iniciales. Note que los valores de X mayores de 1.00 no se utilizan en el cálculo de d_1 . El apéndice E del **Manual de capacidad de carreteras** contiene una discusión amplia de cómo calcular la demora uniforme para una operación donde se presenten fases protegidas y permitidas.

$$d_1 = \frac{0.5C \left(1 - \frac{g}{C}\right)^2}{1 - \left(\min(1, X) * \frac{g}{C}\right)} \quad (2.24)$$

Donde:

- d_1 = demora uniforme debida al control del semáforo, asumiendo llegadas uniformes en un semáforo de tiempo fijo (s/veh).
- C = longitud de ciclo (s).
- g = verde efectivo para el grupo de carriles.
- X = relación v/c o grado de saturación para el grupo de carriles.

Incremento de la demora

La ecuación 2.25 se usa para estimar el incremento a la demora debido a llegadas no uniformes y fallas temporales de ciclo (demora aleatoria).

Es sensible al grado de saturación del grupo de carriles (X), la duración del período de análisis, la capacidad del grupo de carriles (c) y el tipo de control del semáforo, reflejado por el parámetro de control (k).

La ecuación asume que no hay demanda que provoque formación de colas al inicio del período de análisis (T). Finalmente; el término del incremento de la demora es válido para todos los valores de X , incluso grupos de carriles altamente sobresaturados.

$$d_2 = 900T \left((X - 1) + \sqrt{(X - 1)^2 + \frac{8K * I * X}{cT}} \right) \quad (2.25)$$

Donde:

- d_2 = incremento de la demora para tomar en cuenta el efecto de colas aleatorias y sobresaturadas, ajuste por la duración del período de análisis y tipo de control del semáforo (s/veh). Este factor asume que no hay colas al inicio del período de análisis.
- T = duración del período de análisis (h)
- k = factor de incremento de la demora que depende de los escenarios de control del semáforo. Para semáforos de tiempo fijo $k=0.5$
- I = factor de ajuste que toma en cuenta el efecto de semáforos situados antes de la intersección en estudio para un movimiento determinado.
- c = capacidad del grupo de carriles (veh/h).
- X = relación del volumen con la capacidad del grupo de carriles o grado de saturación.

Factor de ajuste por filtración

El factor de ajuste por filtración cuenta los efectos de semáforos situados en sentido contrario al flujo de tránsito, mide la afluencia de los vehículos que llegan a la intersección bajo estudio. Si el semáforo más cercano está a 1 Km. o más de un movimiento dado en la intersección que se analiza I toma el valor de 1.0.

Para distancias más cercanas I varía entre 0.92 a 0.09, incrementa o disminuye el grado de saturación del semáforo anterior. En ausencia de información se sugiere tomar $I=1.0$, valor que también se aplica a intersecciones aisladas.

Total de la estimación de demoras

La demora en cualquier acceso, d_A , se determina como un promedio ponderado de las demoras totales de todos los grupos de carriles del acceso, mediante la expresión:

$$d_A = \frac{\sum_{i=1}^{n_A} d_i v_i}{\sum_{i=1}^{n_A} v_A} \quad (2.26)$$

Donde:

d_A = demora en un acceso cualquiera.

n_A = número de grupos de carriles en el acceso A.

v_i = flujo del grupo de carriles i .

v_A = flujo de acceso A.

La demora de la intersección, d_I , de igual manera se calcula como el promedio ponderado de las demoras en todos los accesos de la intersección:

$$d_I = \frac{\sum_{A=1}^T (d_A v_A)}{\sum_{A=1}^T v_A} \quad (2.27)$$

Donde:

v_A = flujo ajustado para acceso A. (VPH)

T = número de accesos intersección

Demora por cola inicial

El modelo de la demora estudiado en la sección anterior está basado en la suposición que no hay una cola al inicio del período de análisis de duración T. En los casos donde $X > 1.0$ es para un período de 15 minutos, el siguiente período comienza con una cola inicial.

Esta cola inicial se denota como Q_b expresado en número de vehículos. Q_b es observada al inicio del período rojo y excluye cualquier vehículo en cola debido eventos aleatorios, o fluctuaciones de ciclo a ciclo (un desbordamiento de cola debido a fallas en el ciclo). Cuando $Q_b \neq 0$, los vehículos que llegan durante el período de análisis experimentarán una demora adicional debido a la presencia de una cola inicial.

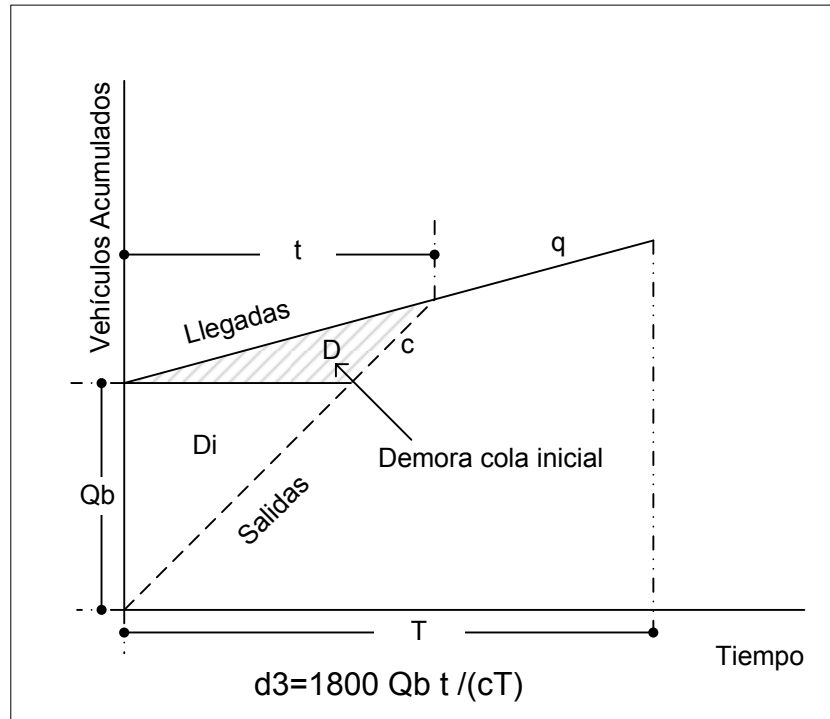
La magnitud de esta demora adicional depende de algunos factores en los que se incluye el tamaño de la cola inicial, la longitud del período de análisis y la relación de volumen de capacidad durante el período de análisis.

El término de la demora inicial se designa d_3 y para su estimación se consideran cinco escenarios denominados casos del I al V.

Los casos I y II ocurren cuando no hay una cola inicial y el período puede o no estar sobresaturado. El caso I es el de la relación $v/c < 1.0$, mientras que el caso II representa la condición de sobresaturación. En ambos casos $d_3=0$ y el modelo de la demora se aplica la ecuación (2.24).

Los casos III, IV y V se representan respectivamente en las figuras 8, 9 y 10.

Figura 8 Caso III demora por cola inicial con su despeje durante T

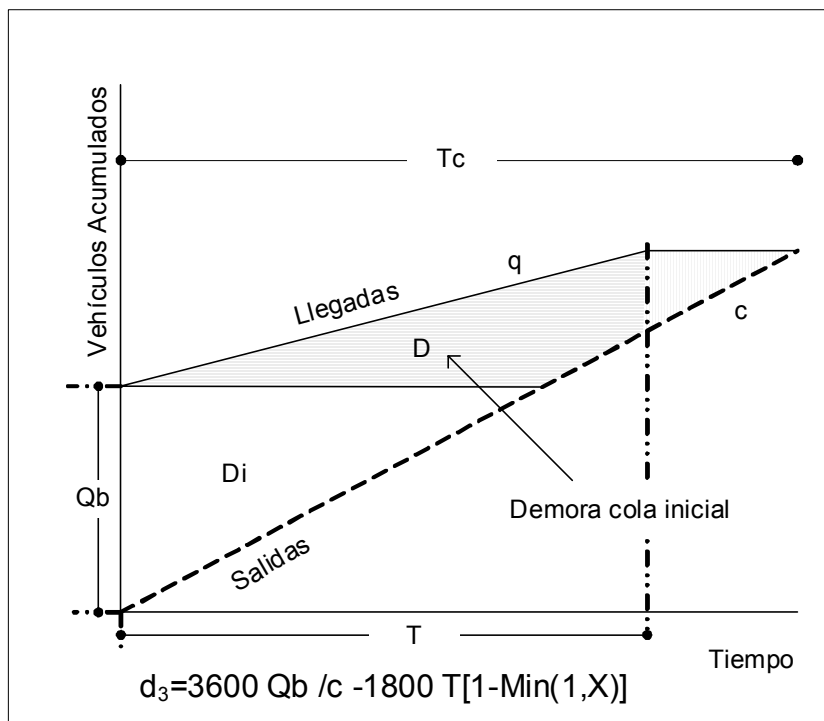


Fuente: Transportation Research Board. **Highway Capacity Manual**. Pág. XVI.143

El caso III ocurre cuando la cola inicial Q_b puede ser completamente servida en el período de tiempo T . Para que esto suceda, la suma de Q_b y el total de la demanda en T , que es $q \cdot T$, debe ser menor que la capacidad disponible, $c \cdot T$.

El caso IV en la figura B ocurre cuando aún hay demanda que no ha sido satisfecha al final de T , pero el tamaño de esta demanda está reduciéndose. Para que esto suceda, la demanda en T (qT), debe ser menor que la capacidad cT .

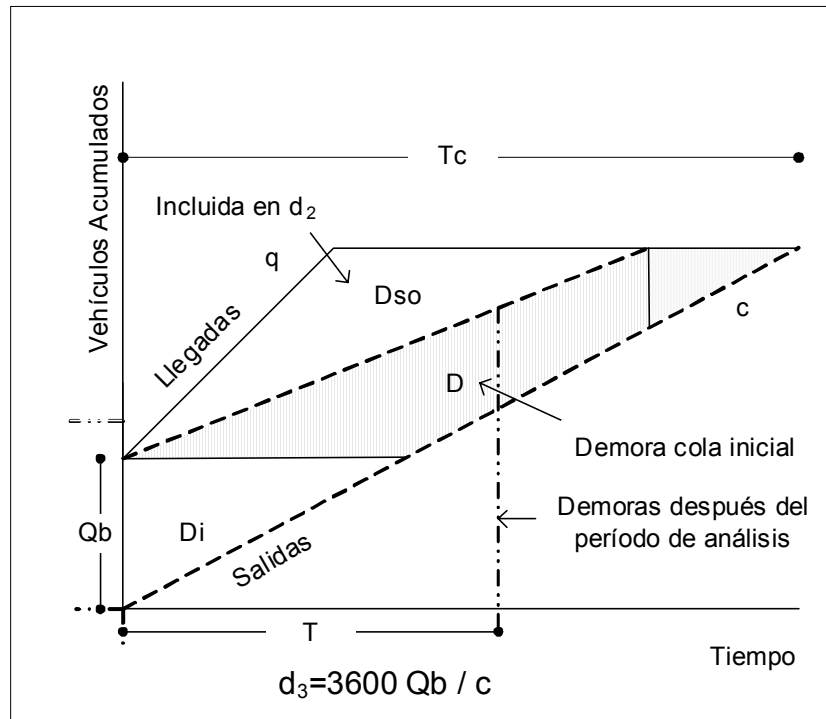
Figura 9 Caso IV, demora cola inicial con demanda disminuyendo durante T



Fuente: Transportation Research Board. *Highway Capacity Manual*. Pág. XVI.143

Finalmente, el caso V de la figura C sucede cuando la demanda en T excede la capacidad. Aquí la demanda no satisfecha se incrementará al final del período T.

Figura 10 Caso V, demora cola inicial con incremento de demanda en T



Fuente: Transportation Research Board. **Highway Capacity Manual**. Pág. XVI.144

El total de la demora, debido a una cola inicial que se incurre en el ciclo promedio, se representa por el área sombreada en las figuras 8 a 10 y etiquetada como D. Ésta representa la demora experimentada por todos los vehículos que llegan durante el período de análisis, incluso, la demora que es experimentada en los períodos de tiempo subsecuentes.

Hay dos componentes excluidos de esta demora. Una es la demora en la que incurren los vehículos en la cola inicial (denominada D_i en los dibujos) y la

otra es la demora de sobresaturación correspondiente a una cola inicial nula (denominada (D_{so} en la figura 10). Este último término está tomado en cuenta en el término d₂ del componente de la demora en la ecuación (2.25).

Estimación de d₃

Una forma generalizada de d₃ aparece en la ecuación (2.28), la cual provee una estimación de la demora inicial por vehículo (en segundos) cuando una cola inicial de tamaño Q_b está presente al inicio del período de análisis T. d₃ es un término en el modelo de la demora dado por la ecuación 2.21.

$$d_3 = \frac{1800Q_b(1+u)t}{cT} \quad (2.28)$$

Donde:

- Q_b = cola inicial al principio del período T (veh).
- c = capacidad ajustada del grupo de carriles (veh/h).
- T = duración del período de análisis (h).
- t = duración de la demanda no satisfecha en T (h).
- u = parámetro del modelo de demora.

Nota: Los parámetros t y u son determinados de acuerdo con el caso que se presenta.

Las ecuaciones (2.29) y (2.30) pueden ser utilizadas para estimar los valores para los casos III, IV y V:

Si Q_b=0 entonces t = 0 de otra manera
$$t = \min\left(T, \frac{Qb}{c * (1 - \min(1, X))}\right) \quad (2.29)$$

Donde

X es el grado de saturación v/c del grupo de carriles

$$\text{Si } t < T \text{ entonces } u = 0, \text{ en otro caso } u = 1 - \frac{cT}{Q_b(1 - \min(1, X))} \quad (2.30)$$

Adicionalmente al cálculo del término de la demora por cola inicial, se puede estimar el tiempo en el cual el último vehículo que llega durante el período de análisis despeja la intersección (medido a partir del inicio del período T), a éste se le denomina tiempo de despeje de la cola inicial T_c .

En los casos I, II y III todos los vehículos despejarán la intersección al final del período T (en adición a las demora normal d_1+d_2). Mientras que para los casos IV y V el último vehículo en llegar al final del período T despejará la intersección en el tiempo $T_c > T$ (de nuevo en adición a d_1+d_2).

Por lo tanto, una fórmula general para el tiempo de despeje de la cola inicial, en el caso que se forme una cola inicial medida a partir del principio del período de análisis T, está dada por la ecuación (2.31):

$$T_c = \max\left(T, \frac{Qb}{c} + TX\right) \quad (2.31)$$

Para resumir el procedimiento que estime la demora de control la tabla V da una comparación de los parámetros para los casos del I al V. Note que en orden de decidir si se aplica el caso III ($t < T$) o el IV ($t = T$), el valor de t debe ser calculado con la ecuación (2.29).

Tabla V Selección de las variables de demora según el tipo de escenario

Caso No.	X	Qb	d ₁	d ₂	t	u	d ₃	Tc
I	≤ 1.0	0	Ec (2.24)	Ec (2.25)	0	0	0	T
II	> 1.0	0	Ec (2.24)	Ec (2.25)	0	0	0	TX
III	≤ 1.0	> 0	Ec (2.32)	Ec (2.25)	Ec. (2.29)	0	Ec. (2.28)	T
IV	≤ 1.0	> 0	Ec (2.32)	Ec (2.25)	T		Ec. (2.28)	Ec. (2.31)
V	> 1.0	> 0	Ec (2.32)	Ec (2.25)	T	1	Ec. (2.28)	Ec. (2.31)

Fuente: Transportation Research Board. *Highway Capacity Manual*. Pág. XVI.145

Para los casos III, IV y V, el componente de la demora uniforme (d₁) debe ser evaluado usando X =1.0 para el período cuando existe una cola sobresaturada (t) y utilizando el valor actual de X para el remanente del período de análisis (T-t). Por lo tanto, en estos casos un valor ponderado del tiempo de d₁ se debe usar como se muestra en la ecuación (2.32).

$$d_1 = d_s * \frac{t}{T} + d_u * PF * \frac{T-t}{T} \quad (2.32)$$

Donde

d_s = demora saturada (d₁ evaluada con X=1.0).

d_u = demora no saturada (d₁ evaluada para el valor actual de X).

En la ecuación (2.32) para los casos IV y V el término se anula debido a que $t = T$.

La ecuación 2.24 es usada para evaluar los componentes d_s y d_u en todos los casos, a excepción de los cruces a la derecha hechos de carriles exclusivos con protección compuesta al cruce (protegida + permitida), usando $X = 1.0$ en la ecuación para calcular d_s y usando el valor actual de X para calcular d_u .

Note que el único lugar donde se aplica PF en el análisis de la cola inicial en este procedimiento es para la porción no saturada d_u en condiciones de un caso III, debido a que la existencia de una cola inicial supera el valor de la progresión en todas las otras condiciones.

Los analistas deben tener una precaución similar en el uso del factor de progresión PF en el análisis del caso II (sobresaturado) usando la ecuación (2.32) porque todos los ciclos, menos el primero, estarán bloqueados por colas iniciales debido a la condición sobresaturada.

Determinación de nivel de servicio

El nivel de servicio está relacionado directamente con la demora promedio por vehículo. Una vez se han estimado las demoras para cada grupo de carriles y se ha evaluado el total de la intersección, se consulta la tabla I para determinar el nivel de servicios apropiado.

2.4.5.6. Módulo extensión de colas

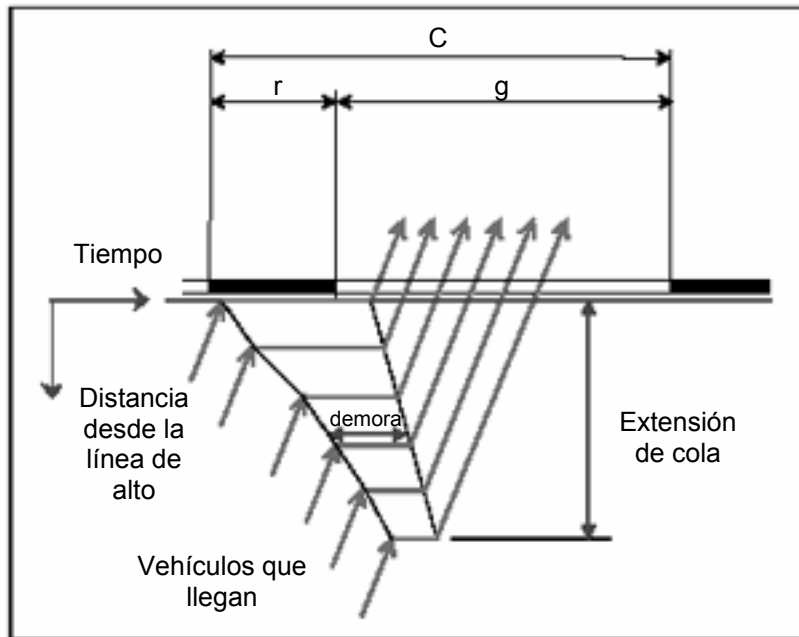
La longitud de la cola que se forma en una intersección se define como la distancia máxima que puede abarcar la fila de vehículos que espera atravesarla cuando la señal del semáforo está en rojo o bien están busca la oportunidad de

paso. Es decir, que la posición del último vehículo que se forma en la cola en un ciclo de semáforo dado, cualquier vehículo que llegue después no experimenta este fenómeno de espera. Este evento no sucede al final del rojo ya que los vehículos continúan formándose en la cola en la primera fase del verde.

Los modelos presentados aquí son para uso en base a análisis de carriles individuales. Para aplicar el método de “grupo de carriles” se debe calcular una longitud promedio de cola.

Para este propósito los parámetros “tasa promedio de flujo de demanda por carril” (v_L), “tasa promedio de flujo de saturación por carril” (s_L), “capacidad promedio por carril” (c_L) y “la demanda inicial de líneas de espera promedio por carril” (Q_{bL}) se calculan para cada grupo de carriles dividiendo los valores totales para el grupo por el número de carriles que lo forman.

Figura 11 Extensión de cola



Fuente: Transportation Research Board. *Highway Capacity Manual 2000*. Pág. XVI.154

Promedio de extensión de cola

($Q, Q_1, Q_2, Q_b, s_L g$ en vehículos; C, r, g en segundos, T en horas; c_L en veh/h y v_L en veh/s). (19-XVI.152)

$$Q = Q_1 + Q_2 \quad (2.33)$$

$$Q_1 = PF_2 \frac{v_L C(1-u)}{1 - \min(1, X_L)u} \quad (2.34)$$

$$Q_2 = 0.25cLT \left\{ z + \left[z^2 + \frac{8k_B X}{c_L T} + \frac{16k_B Q_{bL}}{(c_L T)^2} \right]^{0.5} \right\} \quad (2.35)$$

Donde:

PF_2 = factor de avance de cola.

u = g/C , que es la relación de tiempo de luz verde.

Q_{bL} = el promedio de la demanda inicial de líneas de espera (veh).

k_B = factor de incremento de colas dada por la fórmula.

$k_B = 0.12 (s_L g)^{0.7} I$ Para semáforos de tiempo preprogramado o de tiempo fijo

$k_B = 0.10 (s_L g)^{0.6} I$ Para semáforos accionados por el tránsito (19-XVI.153)

I es el factor de filtración en la dirección opuesta del movimiento vehicular cuando llegan grupos de vehículos (pelotón) a la intersección.

$I = 1.0 - 0.91 (\min. (1.0, X_u))^{2.68}$ para arribo de vehículos en pelotón

$I = 1.0$ para llegadas en forma aleatoria.

X_u es el grado de saturación (relación v/c) en la línea de parada en la dirección opuesta del flujo vehicular.

Z es un parámetro que se calcula mediante la siguiente fórmula :

$$z = (X_L - 1) + \frac{Q_{bL}}{c_L T} \quad (2.36)$$

La fórmula original puede ser expresada en términos de X_L de la siguiente manera:

$$Q_2 = 0.25 * c_L T * \left\{ (X_L - 1 + \frac{Q_{bL}}{c_L T}) + \left[(X_L - 1 + \frac{Q_{bL}}{c_L T})^2 + 8k_B (\frac{X_L}{c_L T} + \frac{Q_{bL}}{(c_L T)^2}) \right]^{0.5} \right\} \quad (2.37)$$

Percentil de extensión de colas

Debido a que el flujo de tránsito varía de ciclo a ciclo; también hay variabilidad en la posición del final de la cola. El percentil de la extensión de cola es el número de veces en que la posición de la cola es excedida durante el período pico que se analiza. Por ejemplo, el 90 percentil significa que la longitud de la cola calculada se espera que sea más larga el 10% del tiempo.

(Q, Q% en vehículos)

$$Q_{\%} = f_{B\%} Q \quad (2.38)$$

Donde

$$f_{B\%} = p_1 + p_2 e^{-Q/p^3} \quad (2.39)$$

Los parámetros p_1 , p_2 y p_3 para los factores percentiles 70, 85, 90, 95 y 98 de la extensión de colas para semáforos de tiempo fijo se muestran en la siguiente tabla.

Tabla VI Parámetros para valores percentiles de extensión de colas para semáforos de tiempo fijo.

	Semáforos de tiempo fijo o predeterminado		
	p_1	p_2	p_3
$F_{B70\%}$	1.2	0.1	5
$F_{B85\%}$	1.4	0.3	5
$F_{B90\%}$	1.5	0.5	5
$F_{B95\%}$	1.6	1.0	5
$F_{B98\%}$	1.7	1.5	5

Fuente: Transportation Research Board. *Highway Capacity Manual 2000*. Pág. 156

Relación de almacenamiento de colas (19-XVI.156)

(Q , $Q_{\%}$, en vehículos, L_a , L_h en metros)

Relación promedio de almacenamiento de colas (19-XVI.156)

$$R_q = \frac{L_h Q}{L_a} \quad (2.40)$$

Relación percentil de almacenamiento de colas (19-XVI.156)

$$R_{Q\%} = \frac{L_h Q_{\%}}{L_a} \quad (2.41)$$

Donde:

Lh = el espaciamiento (espaciamiento promedio en una cola estacionaria) en metros.

La = la distancia de almacenamiento disponible en metros.

Q = extensión promedio de cola (vehículos por carril).

Q% = extensión percentil de cola (Vehículos por carril).

La distancia disponible de almacenamiento puede ser calculada como la distancia en que la cola se ve bloqueada, que es la extensión de la cola después de la intersección.

Tiempo para que se despeje la cola

(s_L en vehículos, g_s r en segundos)

$$g_s = \frac{PF_2 y_L r}{1 - y_L}, \text{ sujeto a } g_s \leq g \text{ (Intersecciones de tiempo pre programado)}$$

PF₂ es el factor de progresión de colas

Parámetros del modelo

(s_L , Q_{bL} en vehículos, T en horas, c_L en Veh/h, v, v_L, s, s_L en veh/h)

Tasa de flujo ajustada y relación de flujo (3-6)

$$v_L = \frac{v_1}{N_{LG}} = \frac{v + \frac{Q_b}{T}}{N_{LG}} = \frac{v}{N_{LG}} + \frac{Q_{bL}}{T} \quad (2.42)$$

$$y_L = \frac{v_L}{s_L} = \frac{v}{s} + \frac{Q_{bL}}{s_L T} \quad (2.43)$$

$v_L = \frac{v}{N_{LG}}$ y $y_L = (v/s)$ para una demanda inicial de cola igual a cero, por lo tanto,

$$Q_{bL}=0$$

Grado de saturación (3-6)

$$X_L = \frac{v_L}{c_L} = X + \frac{Q_b}{c_L T} \quad (2.44)$$

$X_L = X$ para el caso en que la demanda de cola inicial $Q_{bL}=0$

$$X = v / c$$

Factor de avance de cola (3-6)

$$PF_2 = \frac{(1 - R_p u)(1 - y_L)}{(1 - u)(1 - R_p y_L)} \quad (2.45)$$

Este factor está sujeto a las siguientes condiciones:

- i) $PF_2 \geq 1.0$ para llegadas tipo 1 y 2.
- ii) $PF_2 \leq 1.0$ para llegadas tipos 4 a 6.
- iii) $R_p \leq 1/u$
- iv) $R_p < 1/y_L$
- v) $PF_2 = 1.0$ para $y_L \geq u$ ($X_L \geq 1$)

Donde u es la relación del tiempo de verde (g/C), y_L es la relación de flujo del grupo por carril y R_p es la proporción de vehículos que llegan a la intersección durante el período verde. (3-7)

$$R_p = v_{Lg} / v_L \quad (2.46)$$

Para llegadas aleatorias; tales como se presentan en intersecciones aisladas, $R_p=1.0$, por lo tanto $PF_2=1.0$.

2.5.4.7. Interpretación de resultados

Los resultados del análisis operacional producirá dos resultados claves que deben ser considerados:

- Las relaciones v/c para cada grupo de carriles y en forma global para la intersección.
- La demora promedio para cada grupo, acceso y para la intersección así como los niveles de servicio que correspondan.

Cualquier relación v/c mayor de la unidad es indicativo de colapso actual o potencial y corresponde a condiciones de operación que deben ser mejoradas. Si éste es el caso sólo para algunos de los grupos de carriles, se deduce que el tiempo de luz verde no está en proporciones adecuadas a la demanda.

Para su corrección se orienta el cambio en los tiempos del semáforo o se reorienta la sucesión de fases. Cuando el grado de saturación crítico es mayor que 1.00, significa que, tanto el diseño geométrico como el de los tiempos del semáforo tienen una capacidad inadecuada para manejar los flujos existentes o proyectados.

Los cambios que pueden ser implementados incluyen mejoras en la geometría de la intersección (número y uso de carriles), aumentar la duración de ciclos y/o modificar el esquema de la sucesión de fases del semáforo.

Debe notarse que relaciones v/c cercanas a la unidad representan situaciones con poca capacidad disponible para absorber incrementos en la demanda. Particularmente, cuando se utilizan volúmenes proyectados, los errores en su estimación pueden causar que la intersección proyectada opere en condiciones sobresaturadas.

El nivel de servicio es una medida de la aceptabilidad de los conductores del tiempo que se demoran el atravesar una intersección. Cuando esta demora es inaceptable deben estudiarse sus causas.

Si se debe a una progresión desfavorable, los cambios geométricos y de la señalización no son suficientes ya que el problema se puede solucionar con una mejor coordinación de los semáforos de la vía estudiada.

Se debe hacer énfasis en que puede haber demoras inaceptables donde la capacidad es deficiente, pero también se presenta en algunos casos en que la capacidad es adecuada. Es más, los niveles aceptables de la demora no aseguran automáticamente que la capacidad es suficiente.

El analista debe considerar los resultados, tanto del módulo de capacidad como el del nivel de servicio para obtener la imagen completa de la calidad de la operación de una intersección existente o proyectada.

Debido a la complejidad de esta metodología, se cuenta con hojas de cálculo para cada módulo de análisis, las cuales se incluyen en el apéndice I.

2.5.4.8. Otros análisis

Se pueden emplear los módulos de análisis descritos anteriormente para conocer los valores de ciertos parámetros, en función de otras cantidades conocidas. Estas aplicaciones incluyen las siguientes:

Determinar las relaciones v/c y tasas de flujo asociadas con niveles de servicio seleccionados, dado que se conoce el diseño de la señalización y la geometría.

Encontrar los tiempos de los semáforos para determinado nivel de servicio, tasas de flujo de demanda y el diseño geométrico.

Estimar los parámetros geométricos (número y ancho de carriles, distribución del uso de carriles, etc.), cuando se identifican los flujos de demanda para determinado nivel de servicio y se conocen las condiciones del semáforo.

2.5.5. Modelos de simulación de tránsito y criterios para selección de programas de computadora

Desde los primeros días del desarrollo de la teoría del tránsito se han hecho varios esfuerzos por aplicar las técnicas de simulación del comportamiento vehicular, sin embargo, con el gran avance en el procesamiento de datos por computadora se ha tenido un auge en el uso de los modelos para la simulación del tránsito.

La simulación por computadora juega un papel muy importante en el análisis y evaluación del sistema de transporte de carreteras y sus

componentes. A menudo, incorporan otras técnicas analíticas tales como estimación de oferta y demanda, análisis de capacidad, modelos de flujo de tránsito, la teoría de comportamiento de la fila de vehículos, los efectos dinámicos de salidas y paradas y el análisis de líneas de espera a un entorno urbano o rural para simular sus complejos componentes y sus interacciones.

Según sean de los objetivos de la simulación, los modelos pueden ser macroscópicos, que utilizan descriptores tales como el flujo, la velocidad y la densidad, o bien microscópicos que detallan el movimiento individual de los vehículos, a través de la cinemática particular de cada uno de ellos.

A su vez, los modelos macroscópicos se aplican a grandes áreas geográficas y son muy útiles para la planificación del transporte y el análisis de la operación de corredores urbanos. Debido al detalle requerido en los modelos microscópicos su uso se circunscribe a pequeñas áreas para el análisis del comportamiento vehicular.

Las metodologías presentadas por el manual de capacidad de carreteras para la planificación y análisis operacional de un elemento individual de la red vial están basadas en modelos estadísticos que presentan algunas limitaciones y pueden ser consideradas como macroscópicas, esto se debe a que en dichos modelos no se considera el comportamiento individual de los vehículos y también por su naturaleza determinística.

En la actualidad, se acepta que los modelos microscópicos estocásticos pueden ser sumamente útiles en el análisis de redes viales pequeñas o medianas.

Una de las fortalezas de los modelos de micro simulación es que se basan en los movimientos aleatorios de cada vehículo. Esta modelación

discreta provee la oportunidad de visualizar una animación de los vehículos en una representación gráfica de la red vial.

Adicionalmente, los modelos de simulación no necesitan modelar explícitamente los comportamientos tales como las colas, los grupos de vehículos u ondas de choque de salidas y paradas. Estas situaciones ocurren en la simulación por la misma razón que ocurre en la infraestructura vial, como consecuencia natural de la interacción de los conductores, los vehículos, la geometría y los mecanismos de control.

Los principales factores que pueden afectar para decidir qué programa de computadora se debe utilizar para un proyecto específico son:

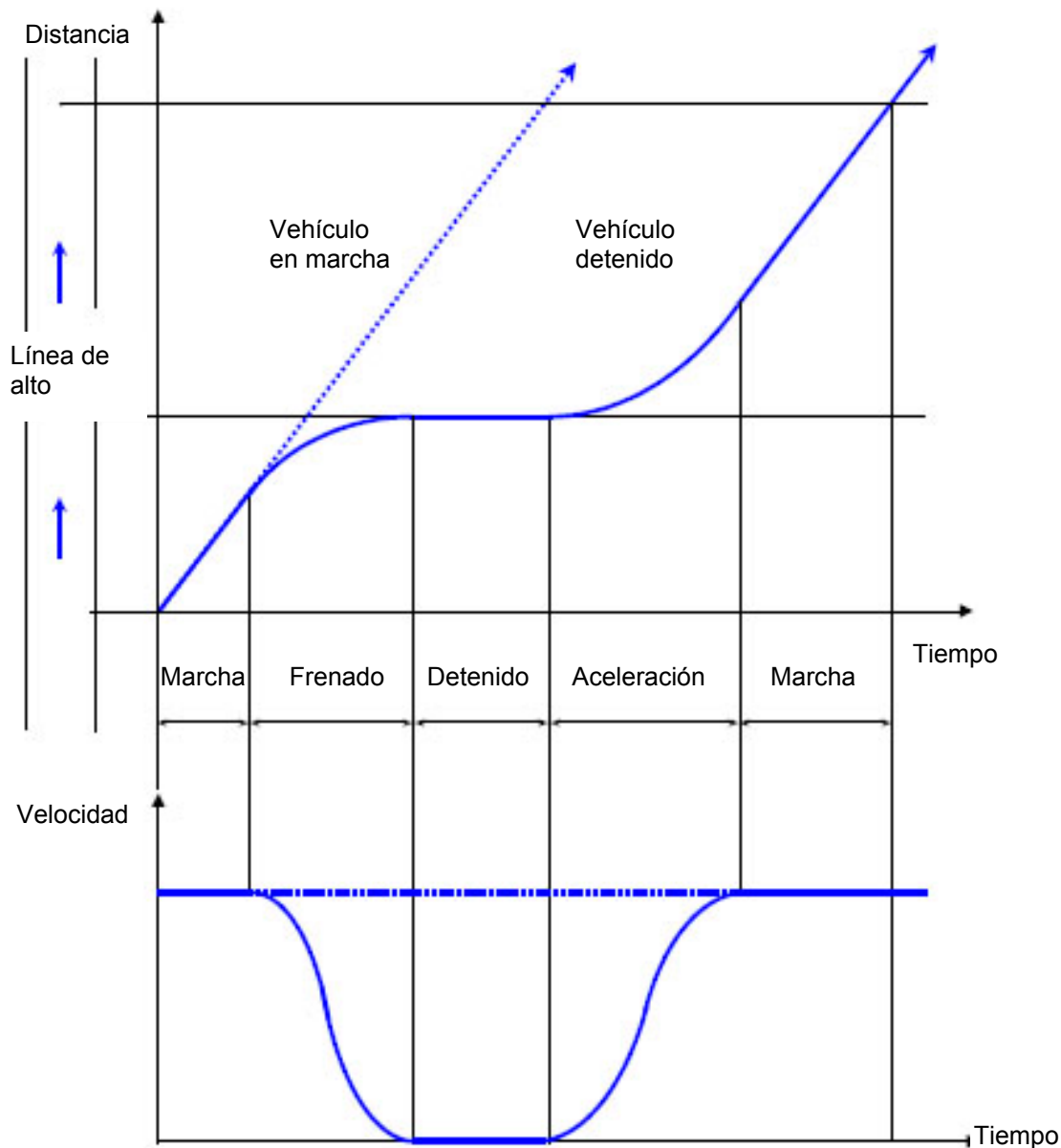
- La consistencia de los resultados de los modelos con las medidas de efectividad tradicionales de la ingeniería de tránsito.
- El desarrollo del modelo, en él se consideran los requisitos de los datos de entrada y el esfuerzo que se debe hacer para codificarlos.
- Calibración de las condiciones reales de campo, tales como el comportamiento de los conductores, las características del flujo de tránsito y las operaciones de los dispositivos de control.
- Los requisitos de verificación como tiempo de viaje, longitud de colas y nivel de servicio.
- Animación y representación gráfica del flujo vehicular en las que se consideran las opciones de visualización, fondos y caracterización de los vehículos.
- Los datos de salida de los modelos y su consistencia con la versión más reciente del **Manual de Capacidad de Carreteras**.
- Requisitos de computación y compatibilidad con el sistema operativo que el que se cuenta.

2.5.6. Modelos de aceleración y frenado

Modelar las distancias y tiempos de aceleración y frenado asociados con ciclos de cambios de velocidad (las maniobras de detener y comenzar la marcha, disminuir o incrementar la velocidad) en las condiciones normales de conducción es esencial para el análisis de costos de operación, consumo de combustible y emisión de polución, así como para evaluar la geometría y los componentes de los fenómenos de espera de la demora.

De manera similar, modelar las características de aceleración y frenado es clave para la exactitud de los modelos de micro simulación. En la figura 12 se puede observar el comportamiento de un vehículo cuando se aproxima a una intersección con semáforo.

Figura 12 **Modelo de aceleración y frenado**



Fuente: Akçelick, Rahmi and Mark Besley. *Acceleration and deceleration Models*. Pág. 2.

En esta sección se describen los modelos de aceleración y frenado, se enfatiza en la necesidad de investigación para mejorar la calibración de los modelos considerando diferentes tipos de vehículos (carros, buses y camiones),

tipos de componentes de infraestructura vial (intersecciones rotatorias, controladas por semáforos o mediante señalización, autopistas, etc), tipos de caminos (urbanos, rurales o en centro de ciudades) y un amplio rango de velocidades iniciales y finales.

El modelo polinomial de aceleración y puede expresarse de la siguiente manera (5-6):

$$a(t) = r * a_m \theta_m (1 - \theta_m)^2 \quad (2.47)$$

$$v(t) = v_i + 3.6 r a_m t_{a/f}^2 \theta^2 \left[0.5 - \frac{2\theta^m}{m+2} + \frac{\theta^{2m}}{2m+2} \right] \text{ sujeto a } m > 0 \quad (2.48)$$

$$L(t) = \frac{v_i t}{3.6} + r a_m t_{a/f}^2 \theta^3 \left[\frac{1}{6} - \frac{2\theta^m}{(m+2)(m+3)} + \frac{\theta^{2m}}{(2m+2)(2m+3)} \right] \quad (2.49)$$

Donde:

$a(t)$ = tasa de aceleración o frenado al tiempo t (m/s^2) (para aceleración $a > 0$, para frenado $a < 0$).

$V(t)$ = velocidad al tiempo t (m/s).

$L(t)$ = distancia al tiempo t (m).

a_m = máxima tasa de aceleración o frenado (m/s^2) (para aceleración $a_{ma} > 0$, para frenado $a_{mf} < 0$)

θ = relación del tiempo t al tiempo de aceleración o frenado

$$\theta = \frac{t}{t_{a/f}} \quad (2.50)$$

- t = tiempo desde el inicio de la maniobra de aceleración o frenado (seg.)
- $t_{a/f}$ = tiempo total de la aceleración o frenado (seg.)
- v_i = velocidad inicial (Km/h).
- m = parámetro de calibración del modelo. Para velocidades entre 0 y 60 kph
m=0.625.
- r = Parámetro del modelo determinado por la siguiente expresión.

$$r = \frac{(1 + 2m)^{2+1/m}}{4m^2} \quad (2.51)$$

La tasa máxima de aceleración o frenado y el tiempo en que ésta es alcanzada (θ_m) puede determinarse con:

$$a_m = \frac{a_{a/f}}{rq} \quad (2.52)$$

$$\theta_m = (1 + 2m)^{-1/m} \quad (2.53)$$

Donde:

- $a_{a/f}$ = tasa promedio de aceleración o frenado (m/s²)
- q = parámetro calculado con la siguiente expresión (5-7):

$$q = \frac{m^2}{(2m + 2)(2m + 3)} \quad (2.54)$$

El modelo se calibra determinando el parámetro m a partir de distancias y tiempos de aceleración conocidos y valores de velocidades iniciales y finales. Es muy importante recalcar la necesidad de obtener valores reales para cada caso para lo cual se debe hacer un estudio de velocidades del componente de la infraestructura vial que se desee analizar.

2.5.7. Modelos de costos de operación vehicular, consumo de combustible y estimación de poluciones

La estimación de costo de operación, consumo de combustible y emisión de poluciones para evaluar una intersección en condiciones de tránsito pesado es útil para el diseño planificación y manejo del flujo del tránsito. En esta sección se describe un método para obtener modelos matemáticos de los parámetros antes mencionados.

Los costos directos de operación vehicular incluyen combustible y costos adicionales tales como neumáticos, lubricantes, reparación y mantenimiento. Adicionalmente, se considera el costo de tiempo de conductores y pasajeros en los vehículos.

La estimación de consumo de combustible es convertido en costos directos de operación la cual se calcula con el uso vehicular de los ingresos promedio y un factor de valor de tiempo que convierten los ingresos promedio como un valor de tiempo. Los costos de operación para peatones incluyen únicamente el costo de tiempo.

Parámetros de los modelos

Los parámetros en los modelos se pueden agrupar de la siguiente manera:

- i) Parámetros vehiculares.
- ii) Parámetros de tránsito y elementos viales.
- iii) Parámetros de costo.

Los parámetros vehiculares incluyen peso y carga, tasas de consumo de combustible o emisiones y tasas de eficiencia de consumo de combustible o emisión de polución. Estos parámetros se derivan de considerar la composición vehicular (porcentaje de kilómetros por vehículo para cada tipo de vehículo), tipo de combustible, potencia máxima del motor, relación de potencia a peso, número de neumáticos y su diámetro, factor de fricción de rodadura, área frontal y el coeficiente de arrastre aerodinámico.

El consumo de combustible, las emisiones y el costo se calculan tanto para vehículos livianos como para pesados. Como se mencionó anteriormente un vehículo pesado se define como cualquier vehículo que tiene apoyadas más de cuatro ruedas tocando el pavimento en operación normal.

Por lo tanto, buses, camiones, trailers o vehículos articulados, tractores y otros vehículos de movimiento lento se clasifican como vehículos pesados. Todos los otros tipos de vehículos se consideran vehículos livianos.

Los parámetros de tránsito y elementos viales incluyen la velocidad, tasa de aceleración, geometría y pendientes.

Los parámetros de costo abarcan el precio de venta del combustible, factor de costo del recurso del combustible, relación costo de marcha contra el costo del combustible, ingreso promedio y el factor valorizado del tiempo como una proporción del ingreso promedio horario.

Los parámetros del modelo de consumo de combustible y varias tasas de emisiones se pueden observar en la tabla 2.7, los cuales se basan en informes de tránsito en Australia según Bowyer, Akçelik y Bigs (1985) y parámetros de emisiones obtenidos por Holyoake (1985).

En las tabla VIII y IX se detalla la selección de los vehículos representativos, tanto livianos como pesados. Los parámetros de vehículos pesados representan una combinación de vehículos que usan petróleo y diesel. Los parámetros de costo de operación vehicular se dan en la tabla X.

Tabla VII Parámetros para modelos de consumo de combustibles y emisiones

Parámetro	Descripción	Unidades para combustible	Unidades para emisiones	Combustible	CO	HC	Nox
f_i	Tasa de consumo de combustible o emisiones cuando el vehículo está detenido	ml / h	g/h	1350 VL 2000 VP	50	5	2
$10^4 \beta_1$	Parámetro de eficiencia	ml / kJ	g/kJ	900 VL 800VP	150	0	10
$10^4 \beta_2$	Parámetro de eficiencia energía-aceleración	ml / (kJ* m/s ²)	g/(kJ*m/s ²)	300 VL 200 VP	250	4	2
MvVL	Masa promedio de vehículos livianos	kg	kg	1400	1400	1400	1400
MvVP	Masa promedio de vehículos Pesados	kg	kg	11000	11000	11000	11000
Tasa de CO ₂ , en gramos por mililitos de combustible: Vehículos livianos: $f_{co_2VL} = 2.5$ g/ml Vehículos pesados: $f_{co_2VL} = 2.6$ g/ml							

Fuente: Akçelick, Rahmi and Mark Besley. **Operating cost, fuel consumption and emission models in aaSIDRA and aaMOTION**. Pág. 3.

Tabla VIII Datos representativos para vehículos livianos y pesados

Clase de vehículo	Porcentaje de vehículos por kilómetro (%)	Tipo de combustible (porcentaje que funciona con diesel)	Consumo de combustible de motor en marcha (sin aceleración)	Masa de vehículo cargado M (Kg.)	Potencia máxima de motor (kW)
Vehículos livianos					
Automóviles pequeños	30	1	900	1100	64
Automóviles medianos	30	2	1296	1250	80
Automóviles grandes	30	2	1728	1500	110
Furgonetas	8	13	1728	2000	70
Pick up	2	34	1332	2700	75
Combinado	100%	3	1342	1369	83
Seleccionado		3	1350	1400	85
Vehículos pesados					
Camión ligero	60	48	1620	5500	90
Camión mediano	15	87	1800	10000	120
Camión pesado	15	98	2340	16000	170
Trailer	5	100	2520	28000	280
Trailer con doble remolque	5	67	1980	38000	300
Combinado	100%	67	1980	10500	125
Seleccionado		70	2000	11000	130

Fuente: Akçelick, Rahmi and Mark Besley. *Operating cost, fuel consumption and emission models in aaSIDRA and aaMOTION*. Pág. 4

Tabla IX Datos representativos para vehículos livianos y pesados

Clase de vehículo	Número de neumáticos	Diámetro de llanta	Factor de resistencia a la rodadura por tipo de llanta	Área frontal (m ²)	Coefficiente de arrastre aerodinámico (con factor de viento de 1.2)
Vehículos livianos					
Automóviles pequeños	4	0.65	1.00	1.8	0.50
Automóviles medianos	4	0.65	1.00	2.0	0.53
Automóviles grandes	4	0.65	1.00	2.2	0.55
Furgonetas	4	0.65	1.05	2.6	0.62
Pick Up	4	0.80	1.25	4.0	0.66
Seleccionado	4	0.65	1.00	2.1	0.54
Vehículos pesados					
Camión ligero	6	0.80	1.20	5.0	0.70
Camión mediano	6	1.00	1.15	6.0	0.72
Camión pesado	10	1.00	1.10	6.5	0.77
Trailer	18	1.00	1.05	7.0	0.82
Trailer con doble remolque	22	1.00	1.05	8.0	0.86
Seleccionado	8	0.90	1.15	5.6	0.72

Fuente: Akçelick, Rahmi and Mark Besley. *Operating cost, fuel consumption and emission models in aaSIDRA and aaMOTION*. Pág. 4

Tabla X Parámetros de modelo de costos aplicados a Guatemala

Parámetro	Símbolo	Costo aproximado Año 2004
Costo Unitario		Q.
Parámetros de factor de costo de operación	k_0	
Precio de venta de combustibles por galón*	P_b	Q. 19.50
Factor de costo del recurso combustible	f_r	0.70
Relación de costo de operación contra costo de combustible	f_c	3.0
Parámetros de costo de tiempo	k_t	
Ingreso promedio horario (de un trabajador empleado a tiempo completo incluyendo cargas sociales) en “unidades de costo por hora” **	W	15.00 (Q./h)
Factor de valor del tiempo como una proporción del ingreso promedio horario	f_p	0.40
Parámetros de vehículos		
Masa vehículos liviano en Kg.	M_{vL}	1400 Kg.
Masa vehículo pesado en k.o.	M_{vP}	11000 Kg.
Tasa de consumo de combustible de vehículo liviano con motor encendido en galones por hora	f_{ivL}	0.356 (gal/h)
Tasa de consumo de combustible de vehículo pesado con motor encendido en galones por hora	F_{ivP}	0.528 (gal/h)

Fuente: Datos proporcionados por Ministerio de Energía y Minas.

Modelos y datos de ingreso

Los datos para poder realizar las estimaciones se pueden obtener de la siguiente manera:

- a) En forma microscópica (usualmente segundo a segundo) a partir de los datos de un carro instrumentado con el sistema global de posicionamiento (GPS).
- b) Datos de viaje representando un ciclo normal de conducción.
- c) Datos generados por un ciclo de conducción para representar series de eventos de tránsito los cuales se especifican en término de velocidad de crucero, detención de marcha y cambio de velocidad (aceleración o frenado) dadas las velocidades inicial y final para cada evento.

En todos los casos el modelo genera velocidades y aceleraciones instantáneas para cada vehículo. El consumo de combustibles, la emisión de polución y los costos de operación vehicular se calculan para cada intervalo de simulación y los resultados se añaden para cada evento del recorrido entero.

El modelo SIDRA usa cuatro modos elementales del ciclo de recorrido para cada carril de tránsito el modelo deriva ciclos de conducción que consisten en una sucesión de velocidad de crucero, frenado, tiempo detenido y aceleración para condiciones específicas de tránsito representado por la geometría de la intersección los controles de tránsito y demanda de flujos. (7-6)

Los valores de consumo de combustible se calculan para cada uno de los cuatro modos de conducción y los resultados se integran para la maniobra entera de la conducción desde el camino de ingreso pasando por la intersección y llegando a un punto de la vía de salida.

El modelo se aplica para vehículos que forman colas, vehículos livianos y pesados separadamente para cada carril y, entonces, los valores totales se calculan para todo el tránsito que usa dicho carril.

Para vehículos que llegan a la intersección sin formar colas solamente se aplican los componentes de marcha y parada geométrica, mientras que para los vehículos que forman colas los ciclos de marcha se determinan distinguiendo desde paradas largas, movimientos en cola (paradas repetidas en la cola) y las paradas geométricas que son el frenado o parada completa en la ausencia de cualquier otro vehículo.

Consumo de combustible y emisiones

La siguiente función es usada para estimar el valor del combustible consumido (ml) o las emisiones producidas (gramos), ΔF , durante un intervalo de simulación (duración Δt segundos) (7-8):

$$\Delta F = \{ \alpha + \beta_1 v R_T + [\beta_2 + M_v a^2 v / 1000]_{a>0} \} \Delta t \quad \text{Para } R_T > 0 \quad (2.55)$$

$$\Delta F = \alpha \Delta t \quad \text{Para } R_T > 0$$

Donde:

R_T = total de fuerza de tracción (kN) requerida para conducir el vehículo, la cual es la suma de la resistencia a la rodadura, fuerza de resistencia del aire, resistencia de voltear, fuerza de inercia y fuerza de pendiente.

M_v = masa vehicular (Kg.) incluye a los pasajeros y cualquier otra carga.

v = velocidad instantánea (m/s) = v (Km. / h) / 3.6.

a = aceleración instantánea (m/s^2), negativa para el frenado.

α = constante de la tasa de consumo de combustible (ml) cuando el vehículo está detenido, o tasa de emisiones, se aplica durante todos los modos de conducción (como un estimado del combustible utilizado para mantener la operación del motor).

β_1 = parámetro de eficiencia que relaciona el combustible consumido y las emisiones emitidas para la energía suministrada por el motor. Se expresa en consumo de combustible o emisiones por unidad de energía (ml / kJ m/s²) o (g / kJ m/s²).

β_2 = parámetro de eficiencia que relaciona el combustible consumido o las emisiones durante el período de aceleración con la energía de inercia y aceleración, se expresa en consumo de combustible o emisiones por unidad de energía-aceleración (ml / kJ m/s²) o (g / kJ m/s²).

La ecuación 4.1 representa un modelo de consumo o emisiones basado en energía, donde potencia total de tracción, P_t y potencia inercial P_i (kW) son:

$$P_t = R_t v \quad (2.56)$$

$$P_i = M_v a v / 1000 \quad (2.57)$$

Principales contaminantes producidos por el transporte y modelos para su estimación

El transporte es uno de los mayores contribuyentes a la emisión de contaminación hechos por el hombre. La mayor parte de las emisiones por vehículos de transporte son generadas en el proceso de combustión y evaporación misma del combustible.

La gasolina y el diesel, que son los combustibles de uso común, están constituidos por compuestos de hidrógeno y carbono. En una combustión perfecta todo el hidrógeno del combustible se convierte en agua y el carbón en dióxido de carbono.

Desafortunadamente, el proceso de combustión perfecta es imposible de conseguir en la práctica y como resultado se tienen productos de desecho del proceso de combustión y evaporación del combustible.

Las principales emisiones producidas por motores típicos son el monóxido de carbono (CO), los hidrocarburos (HC), los óxidos del nitrógeno (NO_x), ozono (O₃) y partículas sólidas (PM10).

El monóxido de carbono es el producto de una combustión incompleta; se caracteriza por ser un gas incoloro, inodoro y venenoso, reduce el flujo de oxígeno en el torrente sanguíneo y es dañino para todos los seres vivos. En algunas áreas urbanas la contribución de vehículos automotores a la producción del monóxido de carbono puede exceder del 90%.

Las emisiones de hidrocarburos (HC) resultan del combustible que no se quemó completamente en el motor. Reacciona con los óxidos nitrosos y la luz solar para formar ozono (O₃), el cual es el mayor componente de la niebla de color café claro y el humo.

El ozono es una de las emisiones que causan irritación de los ojos, daña el tejido pulmonar y afecta la salud del sistema respiratorio.

Aún más, los hidrocarburos emitidos por motores viejos son tóxicos y son conocidos por causar cáncer a largo plazo. Mientras que el CO y HC son los productos de una combustión incompleta de los motores, los óxidos de nitrógeno (NO_x) se forman por la reacción de los átomos de nitrógeno y oxígeno en alta presión y temperatura en el proceso químico que ocurre durante la combustión. Los óxidos nitrosos también contribuyen a la formación de ozono y lluvia ácida.

Los niveles más altos de CO y HC se producen en condiciones de una mezcla (oxígeno-combustible) rica mientras que NO_x se produce en una mezcla pobre. Las condiciones de mezcla rica en los motores se producen durante la aceleración a altas velocidades y en pendientes fuertes. Por lo tanto; los altos niveles de CO y HC se generan en áreas con alta densidad de tránsito.

Las partículas de materia (PM10) son pequeñas partículas de cenizas, carbón negro y hollín con un diámetro aerodinámico nominal menor o igual a 10 micrómetros (10 μm) (que es alrededor de 1/7 del grosor de un cabello humano). Estas partículas pueden estar suspendidas en el aire por mucho tiempo y son muy perjudiciales para la salud ya que pueden penetrar hasta los tejidos más profundos de los pulmones. Otro efecto nocivo es que reducen la visibilidad.

Los modelos para estimar las emisiones instantáneas de monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC) y óxidos nitrosos (Nox) tienen la misma estructura que el modelo de consumo de combustible con parámetros diferentes (ver tabla I). Los valores de emisiones son estimados directamente de los estimados de consumo de combustible, por ejemplo para el monóxido de carbono, se tiene:

$$\Delta E(\text{CO}) = f_{\text{CO}} \Delta F \quad (2.58)$$

Donde:

$\Delta E(\text{CO})$ = emisión de monóxido de carbono en mL.

f_{CO} = tasa de producción de monóxido de carbono (g/mL), según tabla VII

ΔF = consumo de combustibles en mL.

La tasa instantánea de emisiones para cualquier paso de simulación, es calculado como:

$$f_t = \Delta F / \Delta t \quad (2.59)$$

Modelo costo operación

La estimación del costo de operación incluye los costos directos de operación (costo del recurso combustible y costos adicionales de funcionamiento tales como las llantas, lubricantes, reparación y mantenimiento expresados en términos de un factor de costo de combustible). Para este propósito se calcula, tanto el factor de costo de operación (k_o) como el costo del tiempo por vehículo (k_t).

El modelo de costos incluye el tipo de moneda en que se evalúa, el precio de venta de los combustibles, el factor costo del recurso combustible, relación entre el costo de funcionamiento al costo del combustible, ingresos promedio, tanto de conductores como de pasajeros, un factor para valorizar el costo del tiempo y la ocupación promedio de los vehículos (personas por vehículo).

Los parámetros utilizados en el modelo de estimación de consumo de combustible también son relevantes, incluye la masa vehicular y la tasa de consumo para funcionamiento del motor.

La tabla X muestra parámetros para el modelo de costos con valores actuales, en el caso que se requiera hacer una estimación al futuro hay que tomar en cuenta factores económicos como la inflación y la tendencia del alza Internacional del petróleo y sus derivados.

El costo de operación para un vehículo durante un intervalo de simulación (de duración Δt) es ΔC , expresado en la moneda que se quiera hacer el análisis (US dólares o quetzales), el cual se determina a partir de la siguiente expresión:

$$\Delta C = k_o \Delta F / 1000 + k_t \Delta t / 3600 \quad (2.60)$$

Donde:

ΔF = consumo de combustible (mL) durante Δt .

Δt = duración del intervalo de simulación (segundos).

k_o = factor de costo de operación.

k_t = factor de costo de tiempo.

El factor de costo de operación se calcula mediante la fórmula:

$$k_o = f_c f_r P_p \quad (2.61)$$

En la que:

f_c = factor de costo utilizado para convertir el costo del combustible un costo total de funcionamiento, incluye llantas, lubricantes, reparación y mantenimiento.

f_r = factor del recurso combustible, es la relación entre el precio del recurso combustible del precio de venta al consumidor final o precio de bomba; el precio del recurso combustible es el precio de mayorista, se suma el margen de utilidad y no se toman en cuenta los impuestos.

El costo del tiempo por vehículo, k_t expresado en unidades de moneda por hora (USD/h o Q / h), se estima mediante la expresión que se escribe a continuación (7-9):

$$k_t = f_o f_p W \quad (2.62)$$

Donde:

f_o = factor de ocupación expresado en personas por vehículo.

f_p = factor de valor de tiempo que convierte los ingresos promedio en un valor de tiempo.

W = ingreso promedio (que es el salario por hora de un adulto empleado por tiempo completo) en unidades de costo por hora (USD / h o Q./h)

La tasa instantánea del costo de operación en cualquier intervalo de simulación está dada por (7-9):

$$c_t = \Delta C / \Delta t, \text{ por lo tanto} \quad (2.63)$$

$$c_t = k_o f_t / 1000 + k_t / 3600 \quad (2.64)$$

Las expresiones anteriores también pueden utilizarse para determinar el costo total, empleando el consumo total de combustible en el viaje y el costo de viaje durante el tiempo total.

3. RECOLECCIÓN DE DATOS

En el capítulo anterior se estudió la etapa “generación de modelos”, dentro del contexto de la planificación del transporte, se plantearon algunos procedimientos de análisis del movimiento vehicular para los cuales se necesita recabar la mayor cantidad de información que sea posible, acerca de la situación que se quiere resolver.

La recolección de datos es una fase fundamental del proceso de solución de problemas que consiste en la medición directa de los parámetros empleados en los modelos. A continuación se describe brevemente la manera en que se realizan los estudios de campo de los aforos de volúmenes, la medición de la velocidad, las demoras y el flujo de saturación ideal.

3.1. Aforo de los volúmenes de tránsito

Los estudios sobre volúmenes de tránsito se realizan con el propósito de tener datos reales relacionados con el movimiento de vehículos y/o personas, sobre puntos o secciones específicas dentro de un sistema vial de carreteras o calles. Dichos datos se expresan en relación con el tiempo y de su conocimiento se hace posible el desarrollo de la metodología que permita estimar, de manera razonable, la calidad del servicio que el sistema presta a los usuarios.

Estos estudios varían desde los muy amplios en toda una red o sistema vial, hasta los muy sencillos en lugares específicos tales como en intersecciones aisladas, puentes casetas de cobro, túneles, etc.

Las razones para llevar a cabo los estudios de volúmenes de tránsito son tan variadas como los lugares mismos donde se realizan. El tipo de datos recolectados en un estudio de volúmenes de tránsito depende mucho de la ampliación que se le vaya a dar a los mismos.

Así, por ejemplo, algunos estudios requieren detalles como la composición vehicular y los movimientos direccionales, mientras que otros exigen conocer los volúmenes totales. También, en algunos casos, es necesario aforar vehículos únicamente durante períodos cortos de una hora o menos, otras veces el período puede ser de un día, una semana, un mes o inclusive un año.

Existen diversas formas para obtener los recuentos de volúmenes de tránsito, para lo cual se ha generalizado el uso de aparatos de medición de diversa índole. Estas formas incluyen los aforos manuales a cargo de personas, los cuales son particularmente útiles para conocer el volumen de los movimientos direccionales e intersecciones, los volúmenes por carriles individuales y la composición vehicular.

Los aforos pueden ser también por combinación de métodos manuales y mecánicos, tales como el uso de contadores mecánicos accionados por observadores. Los aforos con el uso de dispositivos mecánicos, los cuales automáticamente contabilizan y registran los ejes de los vehículos y los aforos con la utilización de técnicas tan sofisticadas como las cámaras fotográficas, las filmaciones y los equipos electrónicos adaptados a computadoras.

3.2. Medición directa de demora en intersecciones con semáforo

Como una alternativa de la estimación de la demora promedio por vehículo usando la ecuación (20) del capítulo anterior, se puede medir la demora directamente en el sitio donde se requiere hacer estas mediciones, entre los que destacan el método del vehículo de prueba y por medio de los volúmenes de salida, ciclo por ciclo. A continuación se describirán estos procedimientos.

3.2.1. Método del semáforo

El método que se resume en esta parte, está basado en la observación directa de “conteos de vehículos detenidos” en la intersección y es el enfoque de uso más común en la estimación de la demora. En la figura 12 se muestra una hoja de campo que se emplea para el registro de las observaciones y los cálculos de la demora promedio por vehículo. Se deben seguir los siguientes pasos:

- Identificar la longitud máxima de la cola de vehículos detenidos durante el período que más interesa.
- A intervalos regulares entre 10 y 20 segundos, se cuenta únicamente el número de vehículos que detienen su marcha. Este dato se anota en la casilla correspondiente. Los minutos se escriben en la columna extrema izquierda de la hoja y los intervalos (medidos en segundos) en la fila superior.

- Durante el período de estudio también se debe contar los vehículos que salen de la intersección por el grupo de carriles en observación.
- Sumar cada columna del conteo de vehículos detenidos en la intersección. Sumar los totales de las columnas y así obtener el volumen total de vehículos que se detuvieron en la intersección.
- Si se asume que un vehículo observado se detuvo en la intersección un tiempo promedio, la demora media por vehículo puede ser calculada como:

$$d = \Sigma (Vs) * I / V \quad (3.1)$$

Donde:

$\Sigma (Vs)$ = sumatoria del conteo de vehículos detenidos.

I = intervalo entre vehículos detenidos.

V = volumen total observado durante el período de estudio.

3.2.2. Método del vehículo de prueba

Los siguientes pasos se aplican cuando se utilizan para determinar el nivel de servicio de arterias urbanas y suburbanas, así como para evaluar la demora en intersecciones con semáforo.

- Identificar y hacer inventario de la geometría y control de accesos para cada tramo de arteria, longitudes del tramo y semáforos existentes.

- Se toman tasas de flujo de 15 minutos para las horas del día seleccionadas (tales como los períodos pico de la mañana y de la tarde o un período representativo de flujo sin congestión) y se establecen las direcciones de los flujos.
- Determinar una velocidad apropiada del flujo libre para el tramo de arteria que va a ser evaluada. Para vías existentes, esto puede hacerse por medio de recorridos con un vehículo equipado con un velocímetro calibrado a tiempos de bajos volúmenes. Registrar lecturas para cada tramo de arteria. Estas observaciones son complementadas por estudios de velocidad de punto realizados a mitad de cada tramo durante condiciones de volumen bajo. Otros datos tales como tipo de diseño, puntos de acceso, desarrollo del uso del suelo en el área adyacente a la vía y la velocidad límite se pueden considerar.
- Hacer estimaciones del tiempo de viaje en el tramo de vía a determinadas horas del día.
- La forma más sencilla de medición es por medio de dos cronómetros. Se debe anotar la ubicación de todos los puntos de control y su distancia del punto de inicio del estudio. El vehículo de prueba debe conducirse varias veces del mismo origen al mismo destino.
- Registrar el tiempo de viaje acumulado (TAV), entre la salida de una intersección con semáforos y otros puntos de control. Tomar nota de las demoras acumuladas (y su causa) en cada punto predeterminado. También se debe anotar la causa principal de paradas en sitios intermedios.

- Al hacer recorridos de prueba, se debe iniciar cada uno a diferentes tiempos del ciclo del semáforo, para evitar que en todos los viajes se tenga la posición del primero de la fila.
- Registrar algunas lecturas del velocímetro como una comprobación de la velocidad en viajes sin estorbos y ver como se relacionan con velocidades a flujo o libre.
- Se debe tomar datos del tiempo promedio de viaje, el tiempo promedio que se estuvo parado, así como la causa de paradas debidas a eventualidades.
- El mínimo de recorridos de prueba dependerá de la varianza de los datos y la exactitud deseada. Se considera como adecuado ente 6 y 12 recorridos para cada condición de volumen de tránsito.
- Existen equipos computarizados que registran grandes cantidades de datos y simplifican las tareas de medición y análisis.
- Determinar la velocidad promedio de viaje para cada tramo y cada período, para ello se utilizan los tiempos de viaje y longitudes de recorrido. Se debe establecer la velocidad en cada posición de la sección transversal (en los diferentes carriles).
- Con el método del vehículo de prueba se puede realizar una evaluación de diferentes planes de las señales del semáforo.

3.3. Medición del flujo de saturación en campo

A continuación se presenta un procedimiento para medir en el campo la tasa de flujo de saturación que puede usarse como alternativa al método analítico descrito en la metodología del análisis operacional de intersecciones con semáforo.

Se han realizado numerosos estudios que demuestran que este parámetro presenta un alto grado de variabilidad. Entre los factores que lo afectan están el clima, composición del tránsito en proporciones no usuales y otras condiciones locales. Para su aplicación se siguen los siguientes lineamientos:

Se recomienda como personal de campo una pareja de personas, uno de los cuales es designado como tomador de tiempo y el otro como observador.

Tareas generales

- Situarse en un lugar que tenga buena visibilidad del semáforo y de la línea de parada o de cruce peatonal.
- Escoger un punto de referencia donde los vehículos se detengan en forma consistente.
- Hacer un estudio por cada ciclo.

Tareas de observación

- Notar cuál fue el último vehículo que se detuvo en la cola antes que el semáforo diera luz verde.
- Describir este vehículo al tomador de tiempo.
- Anotar en el formulario los vehículos clasificados como pesados y los que dieron vuelta a la izquierda y derecha.
- Registrar el tiempo dictado por el otro operador.

Tareas de toma de tiempos

- Iniciar el cronómetro al principio del verde y advertir al observador.
- Contar en voz alta cada vehículo que cruzó por el punto de referencia cuando pasa su eje trasero.
- Decidir el tiempo del cuarto vehículo, el del décimo y el del último vehículo.
- Si todavía entran vehículos a la intersección cuando finalizó el tiempo de luz verde, se dice “saturación al final del verde, el último vehículo fue el n-ésimo”.

Se deben notar sucesos inusuales que puedan alterar el flujo de saturación tales como buses, vehículos descompuestos, camiones que descargan etc. Medir o evaluar el tipo de área, los anchos y la pendiente del carril estudiado.

El período definido como saturación comienza cuando cruza por el punto de referencia el eje trasero del cuarto vehículo en la cola y termina cuando pasa el último durante la luz verde. Las mediciones deben hacerse por ciclo y por carril.

Para reducir la cantidad de datos, se resta el tiempo registrado para el cuarto vehículo del tiempo del último vehículo. Este valor es el intervalo total para $n-4$ vehículos, siendo n el número de vehículos al inicio de la fase verde. Este intervalo total se divide entre $n-4$ para obtener el intervalo promedio por vehículo bajo el flujo de saturación.

La tasa de flujo de saturación se obtiene al dividir 3,600 entre este último valor.

4. EJEMPLO DE APLICACIÓN

ESTUDIO DEL MOVIMIENTO DEL TRÁNSITO EN LA INTERSECCIÓN DEL BULEVAR A LA COLONIA LOURDES Y LA CALZADA DE LA PAZ

Los métodos de análisis que se describieron en los capítulos anteriores son las herramientas con las cuales se pueden resolver problemas reales a través de un procedimiento lógico que evita las improvisaciones que son muy frecuentes en Guatemala.

Se consideró como un buen caso de estudio la intersección del bulevar a la colonia Lourdes y la Calzada de La Paz, debido a que es un ejemplo típico de una intersección que ordena los movimientos que llegan a ella por medio de un semáforo aislado.

En los últimos años se ha observado un incremento de los volúmenes que usualmente se movían por las vías existentes debido a la creación de la Calzada de La Paz. El crecimiento del tránsito antes de este suceso se regía principalmente por el crecimiento normal de tránsito.

Con la influencia de la Calzada de La Paz se estima que la saturación de las vías se dará en pocos años, por lo que se debe pensar en una estrategia de solución a corto mediano y largo plazo.

Se piensa que, de seguir el control por medio de semáforo, éste ya no será efectivo por lo que será recomendable realizar cambios geométricos.

A través del estudio de los movimientos se pretende encontrar la solución óptima del problema de tránsito apoyándose en la información obtenida de las mediciones de campo por las que será factible realizar un pronóstico de los volúmenes vehiculares futuros.

También es obvio que la falta de información es una limitante para la correcta estimación del crecimiento del tránsito.

4.1. Antecedentes del proyecto

4.1.1. Condiciones físicas y ubicación del proyecto

El área de estudio se encuentra localizada en la zona 16, ciudad de Guatemala a 1,500 m sobre nivel del mar, latitud norte $14^{\circ} 37'$, a una longitud de $90^{\circ} 28'$ oeste y cubre aproximadamente 37 km^2 . En esta región se encuentran los causes de los ríos Contreras, Negro y el riachuelo de Santa Rosita que tiene una orientación de sudoeste o noreste. De la unión de los dos últimos, se forma el río Las Vacas al noreste de Santa Rosa a la altura de la aldea Las Vacas.

4.1.2. Características geológicas

La región está constituida principalmente por piroclásticos de origen diverso del cuaternario, que permanecen estables cuando no son alterados, ya que son susceptibles a la erosión. Predomina la toba volcánica, que tiene un alto ángulo de fricción interno.

4.1.3. Reseña histórica

En esta región se encuentran varias poblaciones que datan desde tiempos de la colonia entre las que destaca la aldea Santa Rosita, así como otras aldeas y caseríos aledaños a esta, entre las que se puede mencionar:

Aldea Las Vacas, Acatán, El Rincón, Pueblo Ralo, Sabana Arriba, Rincón de La Paja y San Gaspar. En los últimos años han surgido varias urbanizaciones entre las que destacan Lourdes, Villas de Cantabria, Cayalá y Canajuyú.

Las vías de comunicación son de construcción reciente, ya que anteriormente se contaba únicamente con el antiguo camino de acceso a Santa Rosita el cual tenía una geometría sinuosa, y con un ancho que permitía únicamente la circulación de vehículos en dos sentidos.

Posteriormente se realizó la pavimentación de la calzada del Colegio Austriaco y la creación de Boulevard que continúa hasta la Colonia Lourdes. La Calzada de La Paz se propuso como una solución para aliviar el tránsito de la carretera al Atlántico y de la calle Martí, su construcción fue posterior a las recomendaciones del plan maestro de transporte metropolitano propuesto por JICA.

4.1.4. Uso del suelo

En estas poblaciones se desarrollaban actividades agrícolas y de ganadería cuando se trasladó la capital de Guatemala al valle de La Ermita o de Las Vacas. El uso del suelo, en la actualidad, es de tipo residencial con muy pocos comercios, y casi no hay presencia de industrias.

En el área de estudio se encuentra el Hospital Militar, dentro de una amplia zona restringida de uso militar.

Todavía se encuentran terrenos grandes con pendientes menores del 30% susceptibles de ser urbanizadas en un futuro. La creación del acceso de San Isidro influirá en el comportamiento de los viajes personales en la pista Santa Rosita – zona 5 y viceversa. La colonia Lourdes es la zona residencial más grande. (2-31)

4.1.5. Modos de viaje

El modo de viaje es un parámetro que refleja las necesidades de la población de trasladarse a través de la región estudiada. Los datos que se reflejan en la siguiente descripción se tomaran del plan maestro de transporte propuesto por JICA, los cuales fueron recolectados por medio de encuestas de viajes personales.

En las mañanas la tendencia más fuerte es en dirección “al trabajo”, mientras que por la tarde es “a casa”.

Se tiene una influencia grande del modo de viaje “a la escuela”, no solo por las Universidades del Valle y Rafael Landívar, sino que en los últimos tiempos se han trasladado varias instituciones educativas, en su mayoría colegios privados que generan viajes personales a la región. (2-33)

Los viajes de tipo comercial están, en su mayoría, en el tránsito que se mueve por la Calzada de La Paz.

4.2. Definición del problema

Al situarse en la intersección del bulevar a la colonia Lourdes y la Calzada de La Paz o al conducir por cualquiera de sus accesos, se observan los clásicos fenómenos de tránsito:

- i. Congestionamiento
- ii. Formación de largas colas en las horas pico con sus excesivas demoras asociadas
- iii. Altos costos de operación vehicular
- iv. Contaminación ambiental

Todos estos fenómenos causan malestar y frustración en los conductores, en los cuales se observa la tendencia de no respetar las señales del semáforo con la consecuencia de posibles accidentes.

En el entronque estudiado se verifican movimientos que son conflictivos entre sí y por ello ha habido tentativas de solución como la instalación de un semáforo por parte de Municipalidad de Guatemala para la regulación de circulación vehicular.

En los últimos años se ha verificado la persistencia y aumento de la magnitud de los problemas de tránsito citados anteriormente. La causa de los mismos no radica únicamente de la sucesión de fases y tiempos del semáforo, sino en los altos volúmenes de tránsito observados y su interacción.

En un momento dado el semáforo será insuficiente debido a que la demanda de movimiento a través de la intersección será mayor que la capacidad del semáforo para permitir el paso con la posibilidad de la saturación de las vías y la prolongación del congestionamiento varias horas después de la hora pico.

4.3. Identificación de objetivos

Los objetivos de solución deben estar encaminados a mejorar la circulación de manera que se tengan valores de demora aceptables por los conductores, así como la disminución del riesgo de accidentes, eliminación de movimientos problemáticos para hacer que los puntos de conflicto estén más separados entre sí.

Existen varias posibilidades de solución en la intersección del bulevar a la colonia Lourdes y la calzada de La Paz, se citan las siguientes:

- No realizar ningún tipo de modificaciones en la intersección.
- Hacer cambios en los tiempos o en las fases del semáforo, para favorecer determinados movimientos.
- Realizar cambios en la geometría de la intersección.

Debido al tiempo y limitaciones presupuestarias pueden planificarse los cambios en bases programadas y fijar metas a corto, mediano y largo plazo.

4.4. Recolección de datos

Para el estudio del movimiento del tránsito en la intersección se aplicaron los procedimientos de análisis que se describieron en los capítulos anteriores. El método desarrollado es el propuesto por el **Manual de capacidad de carreteras** para el estudio de intersecciones con semáforo, el cual requiere conocer los siguientes datos:

Geometría de la intersección

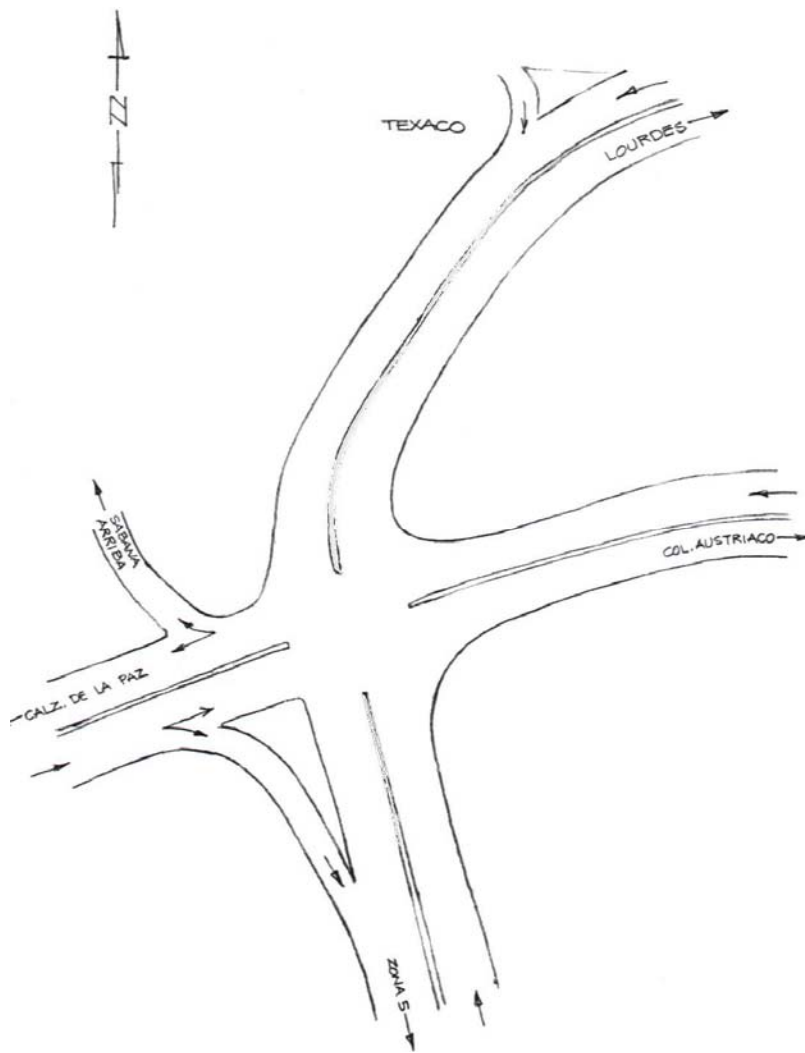
Condiciones del semáforo

Calificación de los volúmenes de tránsito

4.4.1. Geometría de la intersección

No fue posible recolectar información exacta de la geometría de la intersección, sin embargo, se hizo un levantamiento altimétrico en el que se determinaron las magnitudes de las pendientes de los accesos. En la figura 13 se presenta un croquis tomado de una fotografía aérea.

Figura 13 Croquis geometría actual



4.4.2. Sucesión de fases y tiempos del semáforo

La operación del semáforo consiste en el movimiento de un acceso a la vez, es decir, que se tienen movimientos en un acceso y en los otros tres permanecen detenidos, exceptuando el movimiento La Paz - zona 5, el cual está privilegiado por medio de un carril exclusivo de cruce.

De acuerdo con información proporcionada por el Departamento de Semáforos de la Secretaría Técnica de la Municipalidad de Guatemala, los tiempos del semáforo y la sucesión de fases se resumen en la siguiente tabla.

Eventos y ciclos de lunes a domingo

EVENTO	HORA	CICLO
1	00:00	4
2	08:00	2
3	11:00	3
4	14:00	2
5	17:00	3
6	22:00	Destellando

Fase / Ciclo	C1	C2	C3	C4
Zona 5	45	45	105	50
Lourdes	20	35	35	60
Calzada La Paz	15	15	15	35
Col. Austriaco	10	25	45	20
Suma	90	120	200	165

Nota: Tiempos de luz verde, en segundos

Adicionalmente, se observa que antes de cambiar de verde a amarillo esta luz destella durante 3 segundos y la duración de la luz ámbar o amarilla dura también 3 segundos.

4.4.3. Aforo de volúmenes de tránsito

No se pudo contar con información sobre estudios previos, ya que los estudios que realizó la Municipalidad de Guatemala sólo ofrecen datos de flujos totales en ambos sentidos. Estos datos no se pueden utilizar para los fines que se persiguen en el presente trabajo de tesis debido a que fueron tomados en el antiguo camino a Santa Rosita y no se distinguen los movimientos por tipo de vehículo.

De la bibliografía consultada se contó con los datos proporcionados por el estudio del plan maestro de transporte propuesto por la Agencia de Cooperación Japonesa JICA. Estos datos deben ser convertidos a tránsito promedio diario y luego aplicar estos volúmenes a las vías existentes por medio de modelos de asignación de tránsito.

La información se recolectó por observación directa, se hizo un conteo direccional en el que se distinguen los movimientos por tipo de vehículos. Para el efecto se contó con una cuadrilla de trabajo de nueve personas. El número de operadores requeridos se determinó mediante una observación preliminar, en la que se pudo apreciar lo siguiente:

En los cuatro accesos se observó que hay movimiento fuerte en una dirección preferencial, por lo que se estimó que un operador controlaría dicho movimiento y que bastaba un solo operador para controlar cada una de las otras direcciones. Dos operadores por cada acceso hacen un total de ocho y el noveno operador se requirió para cuantificar el tránsito que ingresa a la aldea Las Vacas, debido a que es posible el ingreso a dicha población por cualquiera de los accesos.

Se distinguió que hay dos tiempos en el día en que se presentan horas pico, por la mañana de 6:00 a 8:30 y por la tarde y noche de 8:00 a 20:00.

El procedimiento del conteo consiste en anotar o marcar el número de vehículos que pasa por cada tiempo de luz verde en un formulario diseñado para el efecto. Se hicieron dos turnos de ocho horas cada uno y la información de la madrugada se obtuvo por inferencia estadística.

Figura 14 Formulario de encuesta conteo direccional clasificado

ORIGEN			FECHA_____		
DESTINO			OPERADOR_____		
HORA	CICLO	LIVIANO	BUSES	CAMIONES	TRAILERS

A continuación se describe el procedimiento para realizar el conteo clasificado por tipo de movimiento. Para este efecto se utiliza el formulario correspondiente (Ver Fig. 16), en el cual se anotan los siguientes datos:

- Fecha del conteo.
- Operador o persona que llevó a cabo el conteo.
- Origen, se refiere a los flujos de tránsito que llegan a la intersección por los diferentes accesos, los cuales se les designa un número del 1 al 4.
 - Zona 5
 - Colonia Lourdes y Santa Rosita
 - Calzada de La Paz
 - Colegio Austriaco
- Destino, es el tipo de movimiento efectuado por los vehículos, que puede ser cruzar a la izquierda, seguir de frente o girar a la derecha.
- Se anotan las horas en que inicia y finaliza el conteo.
- En la casilla denominada ciclo se anota el número de orden.
- Se procede a realizar el conteo clasificando los vehículos que se ponen en movimiento cuando el semáforo señala luz verde, entre los cuales se identifican los vehículos livianos, buses, camiones y trailers. Dentro de los vehículos livianos no se incluyen motos y bicicletas, debido a que la mayoría de la muestra entra dentro de esta clasificación.

Los resultados de los conteos efectuados el 2 y 3 mayo de 2004 se resumen en los siguientes cuadros.

Tabla XI Volúmenes de tránsito originados en la colonia Lourdes

ORIGEN: L O U R D E S

Destino Hora	Colegio Austriaco					Zona 5					Calzada de La Paz					Total Acceso (Veh)
	L	B	C	Tr	Total	L	B	C	Tr	Total	L	B	C	Tr	Total	
00:00 - 01:00	7				7	24				24	10				10	41
01:00 - 02:00	1				1	5				5	2				2	8
02:00 - 03:00					0	1				1					0	1
03:00 - 04:00					0					0					0	0
04:00 - 05:00	5				5	290	2	5		297	13				13	315
05:00 - 06:00	303				303	804	14	10		828	65				65	1196
06:00 - 07:00	424	4	1	1	430	1012	28	21		1061	108		4		112	1603
07:00 - 08:00	530	5	2		537	1265	35	26		1326	13		6	0	19	1882
08:00 - 09:00	110		1		111	628	19	4		651	54		3		57	819
09:00 - 10:00	193	7			200	471	15	9	1	496	57		2	3	62	758
10:00 - 11:00	73				73	393	17	5		415	60				60	548
11:00 - 12:00	71		1		72	402	21	16		439	71	2	1		74	585
12:00 - 13:00	90	3	5	2	100	469	21	14	1	505	100		7		107	712
13:00 - 14:00	95	3	1		99	468	22	16		506	97	1	7		105	710
14:00 - 15:00	115	7	5		127	456	25	6		487	88	2	5		95	709
15:00 - 16:00	102	1			103	433	34	13		480	76	1	5		82	665
16:00 - 17:00	95	1	1		97	404	32	12	1	449	71	1	5		77	623
17:00 - 18:00	104				104	368	16	7	1	392	59		5		64	560
18:00 - 19:00	103				103	388	13	8		409	64		4		68	580
19:00 - 20:00	107				107	397	15	9		421	67		3		70	598
20:00 - 21:00	86				86	316	12	7		335	61		3		64	485
21:00 - 22:00	69				69	253	6	6		265	49		4		53	387
22:00 - 23:00	55				55	201		2		203	40		1		41	299
23:00 - 00:00	33				33	120				120	24				24	177
	2771	31	17	3	2822	9568	347	196	4	10115	1249	7	65	3	1324	14261

Vehículos livianos (L)	13588
Buses (B)	385
Camiones (C)	278
Traileres (Tr)	10
	14261

Tabla XII Volúmenes de tránsito originados en la zona 5

ORIGEN: ZONA 5

Destino Hora	Calzada de La Paz					Lourdes					Colegio Austriaco					Total (Veh)
	L	B	C	Tr	Total	L	B	C	Tr	Total	L	B	C	Tr	Total	
00:00 - 01:00	35			1	36	19				19	13				13	68
01:00 - 02:00	15				15	4				4	5				5	24
02:00 - 03:00	5				5	1				1	2				2	8
03:00 - 04:00	2				2	2				2	1				1	5
04:00 - 05:00	10				10	5	5	1		11	7		1		8	29
05:00 - 06:00	23	4			27	21	7	4		32	10	4	5		19	78
06:00 - 07:00	280	6			286	438	28	6		472	300	14	24	1	339	1097
07:00 - 08:00	350	8	2		360	547	40	8		595	375	18	30	2	425	1380
08:00 - 09:00	115	1	3		119	233	15	8	1	257	312	3	23		338	714
09:00 - 10:00	106		1		107	221	11	13		245	286	5	31	3	325	677
10:00 - 11:00	104	2	3		109	270	14	8		292	383	3	50	2	438	839
11:00 - 12:00	103		1		104	285	10	8		303	275	5	38	1	319	726
12:00 - 13:00	90	8	3		101	429	26	12		467	477	3	42		522	1090
13:00 - 14:00	187	6	14		207	287	18	6		311	230	8	19		257	775
14:00 - 15:00	302	5	25		332	230	20	4		254	99	14	4		117	703
15:00 - 16:00	364	5	33	2	404	214	19	9	3	245	118	4	3		125	774
16:00 - 17:00	578	4	41	4	627	252	18	3		273	202	3	3		208	1108
17:00 - 18:00	838	10	40	5	893	362	13	8		383	287	1	1		289	1565
18:00 - 19:00	1158	6	30	6	1200	372	6	4		382	186	6			192	1774
19:00 - 20:00	1330	4	25	4	1363	418	6	3		427	152	2			154	1944
20:00 - 21:00	1260	2	12	3	1277	334	4	2		340	140				140	1757
21:00 - 22:00	756	1	8	4	769	268	1	1		270	112				112	1151
22:00 - 23:00	302		4	3	309	160				160	67				67	536
23:00 - 00:00	80		2	2	84	64				64	34				34	182
	8393	72	247	34	8746	5436	261	108	4	5809	4073	93	274	9	4449	19004

Vehículos livianos (L)	17902
Buses (B)	426
Camiones (C)	629
Traileres (Tr)	47

Tabla XIII Volúmenes de tránsito originados en la calzada de La Paz

ORIGEN: CALZADA DE LA PAZ

Destino Hora	Lourdes					Colegio Austriaco					Zona 5					Total Acceso (Veh)
	L	B	C	Tr	Total	L	B	C	Tr	Total	L	B	C	Tr	Total	
00:00 - 01:00	5				5	8				8	14		1		15	28
01:00 - 02:00	2				2	3				3	6		2	1	9	14
02:00 - 03:00	1				1	1				1	4			0	4	6
03:00 - 04:00					0					0				1	1	1
04:00 - 05:00	18		1		19	68		1		69	37		12		49	137
05:00 - 06:00	44	1	2		47	169		2		171	213		24	1	238	456
06:00 - 07:00	109	2	5		116	422		6		428	1262		60	2	1324	1868
07:00 - 08:00	96	3	5		104	227		7		234	1723		20	3	1746	2084
08:00 - 09:00	41		6		47	186	2	16		204	602		27	1	630	881
09:00 - 10:00	33		2		35	126		10		136	372		25	1	398	569
10:00 - 11:00	45		2	1	48	110		13		123	370	5	35	2	412	583
11:00 - 12:00	38		3		41	97		8		105	371		44	3	418	564
12:00 - 13:00	42	3	4		49	121		8	3	132	330	8	25	1	364	545
13:00 - 14:00	64	5			69	174		7		181	530	6	38	4	578	828
14:00 - 15:00	54	6	9		69	139		2		141	474		33	5	512	722
15:00 - 16:00	44	2			46	125		4		129	313		16	2	331	506
16:00 - 17:00	42		3	1	46	130		5	1	136	249		8		257	439
17:00 - 18:00	57		1		58	120		1		121	254	1	15		270	449
18:00 - 19:00	105				105	143				143	260		16	2	278	526
19:00 - 20:00	113		1		114	174		1		175	276		14	1	291	580
20:00 - 21:00	98				98	166				166	268		12	2	282	546
21:00 - 22:00	78				78	133				133	214		10	1	225	436
22:00 - 23:00	31				31	53				53	86		4		90	174
23:00 - 00:00	12				12	21				21	34		2	1	37	70
	1172	22	44	2	1240	2916	2	91	4	3013	8262	20	443	34	8759	13012

Vehículos livianos (L)	12350
Buses (B)	44
Camiones (C)	578
Traileres (Tr)	40

Tabla XIV Volúmenes de tránsito originados en el colegio Austriaco

ORIGEN: COLEGIO AUSTRIACO

Destino Hora	Zona 5					Calzada de La Paz					Lourdes					Total Acceso (Veh)
	L	B	C	Tr	Total	L	B	C	Tr	Total	L	B	C	Tr	Total	
00:00 - 01:00	3				3					0	1				1	4
01:00 - 02:00					0					0					0	0
02:00 - 03:00					0					0					0	0
03:00 - 04:00	5				5	6				6	7				7	18
04:00 - 05:00	35				35	32		2		34	25				25	94
05:00 - 06:00	88		1		89	80		6		86	63		1		64	239
06:00 - 07:00	146		2		148	133		10		143	105		2		107	398
07:00 - 08:00	183		3		186	166		13		179	131	1	3	1	136	501
08:00 - 09:00	108	1	3		112	93	2	16		111	68	2			70	293
09:00 - 10:00	76	3	4		83	86	1	11		98	44		1		45	226
10:00 - 11:00	132		3		135	84		12		96	57		3		60	291
11:00 - 12:00	135	2	2		139	135		12		147	106				106	392
12:00 - 13:00	137	18	8		163	135		15		150	87	5	2		94	407
13:00 - 14:00	153	6	9		168	151		7		158	97	6	2		105	431
14:00 - 15:00	63				63	75	3	6		84	108	6	3		117	264
15:00 - 16:00	65	1	2		68	110	7	5		122	115	6	5		126	316
16:00 - 17:00	67	2	3		72	145	10	5		160	122	15	7		144	376
17:00 - 18:00	73				73	175	1	15		191	129	1	1		131	395
18:00 - 19:00	133				133	206	3	10		219	144	1			145	497
19:00 - 20:00	167				167	258	4	12		274	180	2			182	623
20:00 - 21:00	105				105	162	3	7		172	113	1			114	391
21:00 - 22:00	63				63	100	1	3		104	68				68	235
22:00 - 23:00	25				25	42				42	27				27	94
23:00 - 00:00	5				5	8				8	6				6	19
	1967	33	40	0	2040	2382	35	167	0	2584	1803	46	30	1	1880	6504

Vehículos livianos (L)	6152
Buses (B)	114
Camiones (C)	237
Traileres (Tr)	1

Tabla XV Clasificación por movimientos

Clasificación por movimientos

Origen	Destino	Matutino	Medio día	Vespertino
Lourdes	Austriaco	537	469	107
Lourdes	Zona 5	1326	506	421
Lourdes	La Paz	112	107	70
La Paz	Lourdes	116	69	114
La Paz	Austriaco	428	181	175
La Paz	Zona 5	1746	578	291
Zona 5	La Paz	360	207	1363
Zona 5	Lourdes	595	467	427
Zona 5	Austriaco	425	522	192
Austriaco	Zona 5	186	151	167
Austriaco	La Paz	179	158	274
Austriaco	Lourdes	136	105	182
	Totales	6146	3520	3783

Tabla XVI Clasificación de movimientos en hora pico matutina

Clasificación hora pico matutina

Origen	Destino	Matutina	Medio día	Vespertina
La Paz	Zona 5	1746	578	291
Lourdes	Zona 5	1326	506	421
Zona 5	Lourdes	595	467	427
Lourdes	Austriaco	537	469	107
La Paz	Austriaco	428	181	175
Zona 5	Austriaco	425	522	192
Zona 5	La Paz	360	207	1363
Austriaco	Zona 5	186	151	167
Austriaco	La Paz	179	158	274
Austriaco	Lourdes	136	105	182
La Paz	Lourdes	116	69	114
Lourdes	La Paz	112	107	70

Tabla XVII Clasificación de movimientos en hora pico vespertina

Clasificación hora pico vespertina

Origen	Destino	Matutino	Medio día	Vespertina
Zona 5	La Paz	360	207	1363
Zona 5	Lourdes	595	467	427
Lourdes	Zona 5	1326	506	421
La Paz	Zona 5	1746	578	291
Austriaco	La Paz	179	158	274
Zona 5	Austriaco	425	522	192
Austriaco	Lourdes	436	105	182
La Paz	Austriaco	428	181	175
Austriaco	Zona 5	186	151	167
La Paz	Lourdes	116	69	114
Lourdes	Austriaco	537	469	107
Lourdes	La Paz	112	107	70

Tabla XVIII Distribución del tránsito por origen

Origen	Distribución por origen					
	Total					
	Matutina	Vespertina	Matutina	Vespertina	Matutina	Vespertina
Lourdes	32.13%	15.81%	49.99%	17.32%	55.33%	31.34%
La Paz	37.26%	15.33%	14.60%	9.48%	16.16%	17.15%
Zona 5	22.45%	52.39%	25.62%	58.73%	17.67%	25.34%
Austriaco	8.16%	16.47%	9.79%	14.47%	10.84%	26.17%

Figura 15 Volúmenes de tránsito originados en la colonia Lourdes

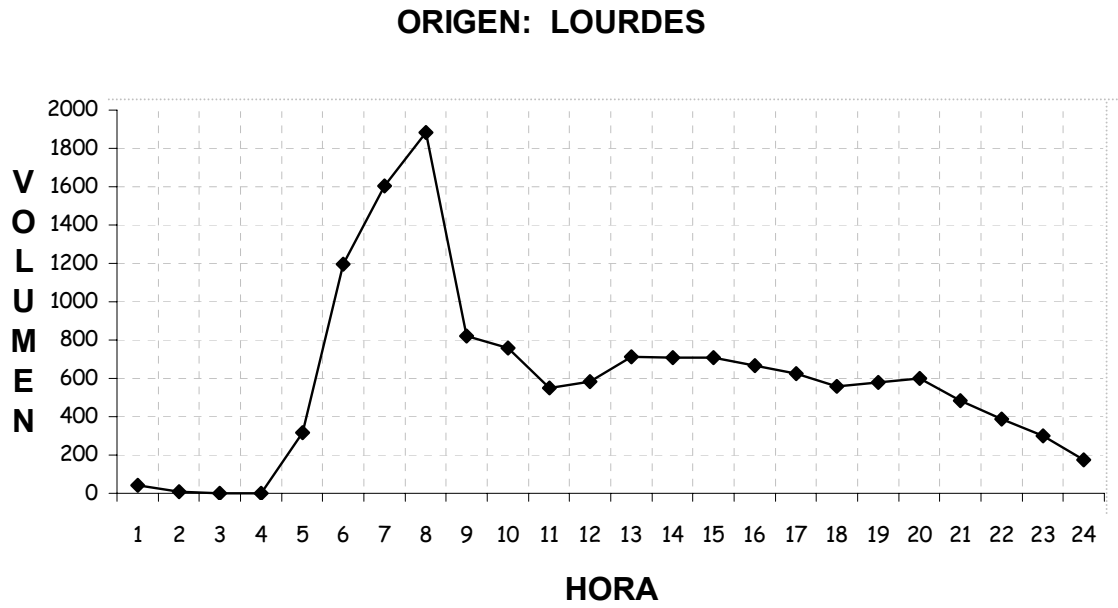


Figura 16 Volúmenes de tránsito originados en la zona 5

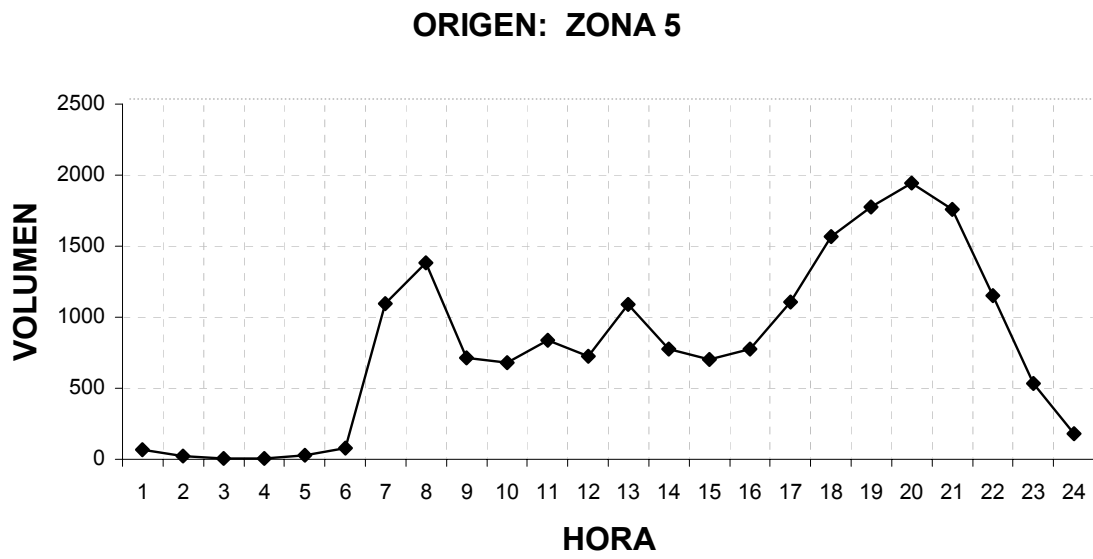


Figura 17 Volúmenes de tránsito originados en la calzada de La Paz

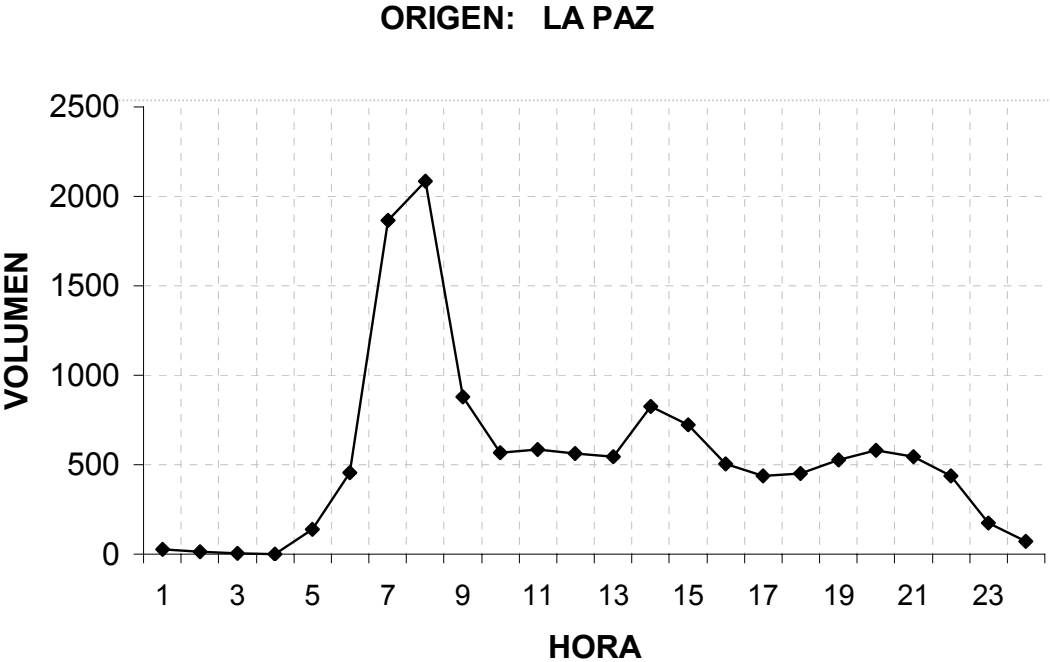


Figura 18 Volúmenes de tránsito originados en el colegio Austriaco

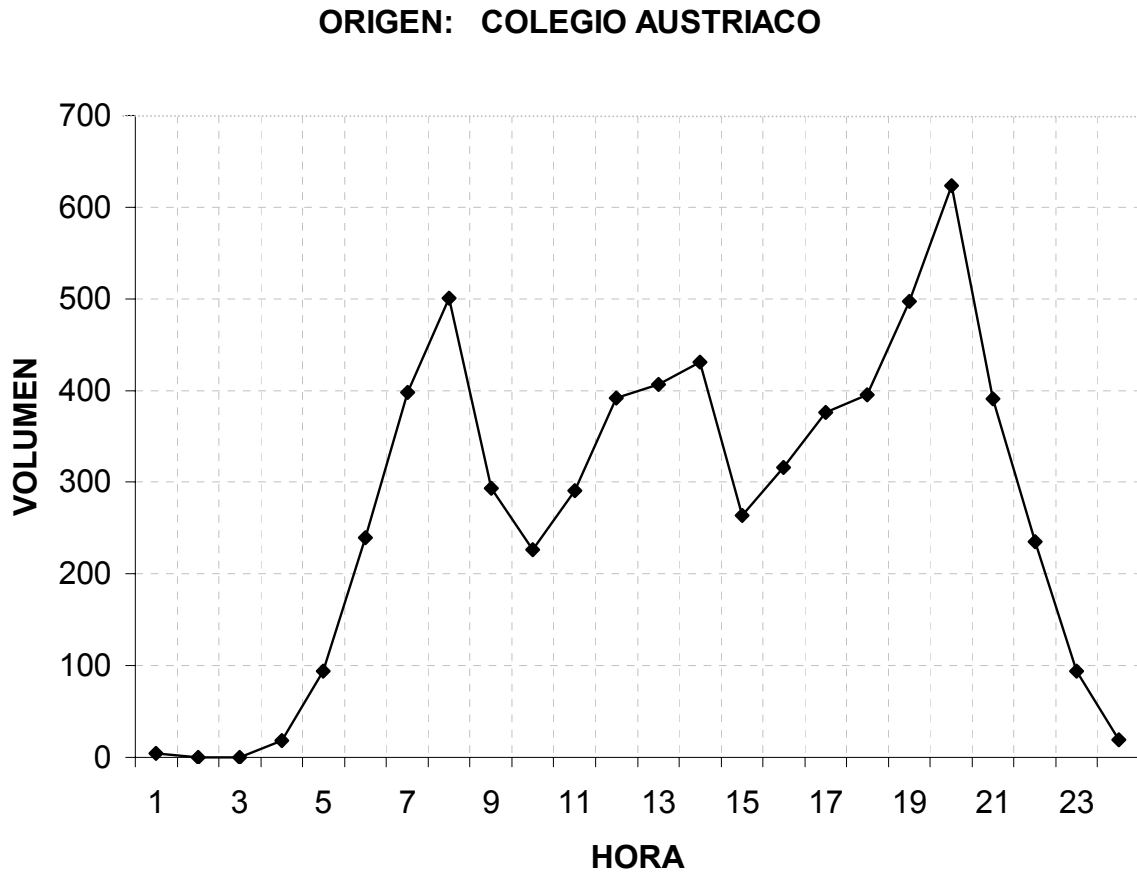
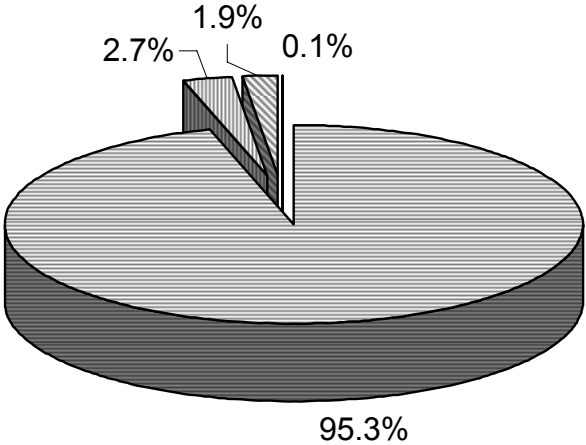


Figura 19 Composición del tránsito originado en la colonia Lourdes



■ Liviano ■ Buses ■ Camiones ■ Trailers

Figura 20 Composición del tránsito originado en la zona 5

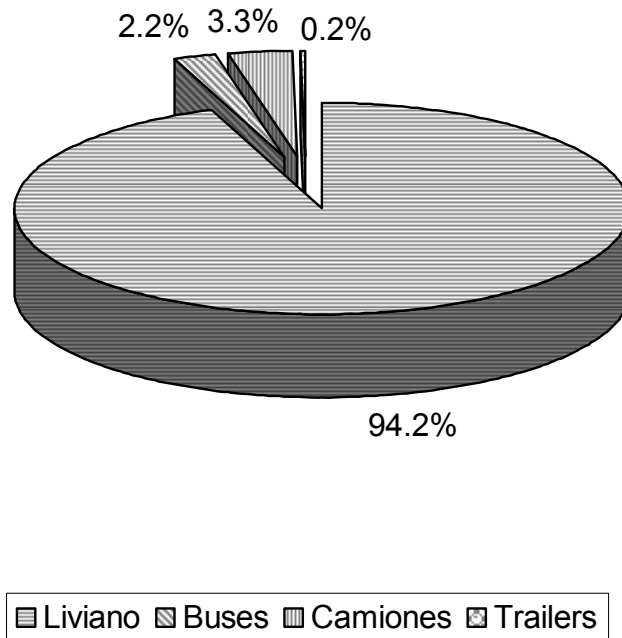


Figura 21 Composición del tránsito originado en la calzada de La Paz

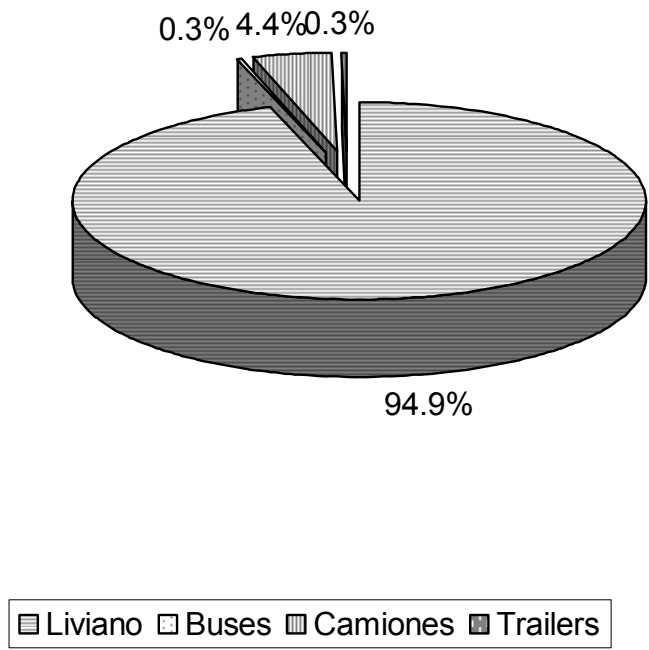
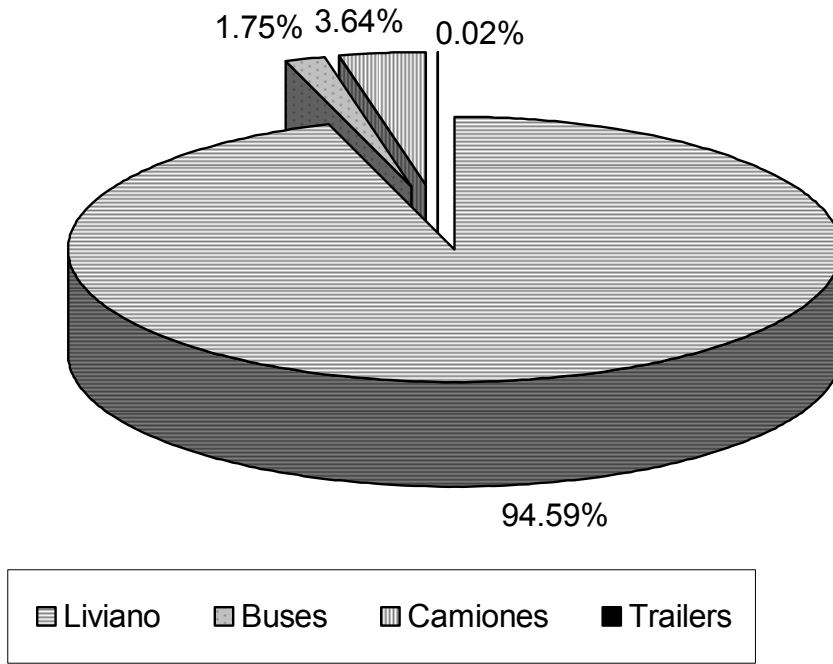


Figura 22 Composición del tránsito originado en el colegio Austriaco



4.5. Modelo del comportamiento del tránsito

Se considera que la manera más adecuada para llevar a cabo al análisis de los datos recolectados en campo, es el procedimiento descrito en el **Manual de capacidad de carreteras 2000**, para intersecciones con semáforo. El método se divide en seis módulos (ver pág. 65) y a continuación se detalla su aplicación al problema de la intersección, objeto del presente estudio.

4.5.1. Ingreso de datos

La información recolectada en campo se resume en la hoja de cálculo mostrada en la Figura 23 (pág. 166) en donde también se muestra un esquema de la intersección y se indica la posición de los accesos y movimientos a los que se hace referencia más tarde.

En la parte central de la misma, se dibujó un croquis del cruce de vías, se anotaron los volúmenes de tránsito de los cuatro accesos en el período de análisis de la hora pico vespertina (de 19:00 a 19:15), así como los datos de la geometría y la composición del tránsito.

En la intersección del bulevar a la colonia Lourdes y la calzada de La Paz se observa que no se presentan maniobras de estacionamiento de vehículos y se estima un promedio de cuatro buses por hora que realizan paradas en los accesos norte (con flujo vehicular proveniente de la colonia Lourdes) y sur (origen centro de la ciudad). Los movimientos peatonales que se observan en campo son de intensidades tan bajas (cinco peatones por hora) que para fines prácticos se pueden despreciar los efectos de la interacción de los vehículos con los flujos peatonales y de bicicletas.

FIGURA 23 HOJA INGRESO DE DATOS

INTERSECCION: Bulevar a Colonia Lourdes y Calzada de La Paz
 ANALISTA: LRAA PERIODO DE ANALISIS: 19:00 a 20:00
 TIPO DE ÁREA: No comercial
 UBICACIÓN Zona 16, ciudad de Guatemala FECHA 24-Abr-04

GEOMETRÍA Y VOLÚMENES

<u>Volúmenes de tránsito</u>		
Origen Lourdes		
Izq. 107	Frente 421	Der. 70
Origen Zona 5		
Izq. 1363	Frente 427	Der. 154
Origen Calzada Colegio Austriaco		
Izq. 167	Frente 274	Der. 182
Origen Calzada de La Paz		
Izq. 114	Frente 175	Der. 291

CONDICIONES DE CALZADA Y TRÁNSITO

Acceso	Pendiente %	%VP	Parqueo carril adyacente	Buses	FHP
N	-5.20	4.74	No	6	0.90
S	+2.22	5.82	No	6	0.95
E	-5.88	5.41	No	0	0.90
W	+8.62	5.14	No	0	0.90


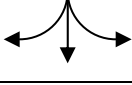
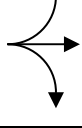
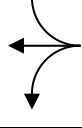
VP: vehículos con más de 4 ruedas FHP: Factor hora pico
 Nm: número de maniobras estacionamiento NB: buses parando en intersecc. / hora
 PC: No. de peatones conflictivos Tipo de llegada: 1-5

FASES (Dibujar diagramas)

 G=45 R+A=95	 G=35 R+A=165	 G=15 R+A=185	 G=45 R+A=155	G= R+A=	G= R+A=
Cruce protegido			Cruce permitido		
Peatones			Ciclo: 123 s		

La intersección no pertenece a un sistema coordinado de semáforos, además el semáforo más cercano está a más de 1 Km. por lo que se estima que las llegadas a la intersección son aleatorias, que se traducen en llegadas tipo 3 (Ref.). En la parte inferior del formulario se anotó la sucesión de fases y tiempos del semáforo. El orden en suceden las fases es el siguiente:

Tabla XIX Sucesión de fases del semáforo

	Acceso	Origen	Destino
1.	Sur	Zona 5	
2.	Norte	Lourdes	
3.	Oeste	Calzada de la Paz	
4.	Este	Colegio Austriaco	

En la mayoría de los accesos se tienen fases de cruce protegidas, ya que no existe interacción con volúmenes de tránsito opuestos, excepto para el movimiento con origen calzada de La Paz destino zona 5 que debe buscar brechas en la corriente de tránsito cuando el semáforo le da derecho de paso a los vehículos provenientes de la colonia Lourdes y a los de la calzada Colegio Austriaco. Este movimiento no pasa por el semáforo, por lo que su capacidad y nivel de servicio se estiman con otros procedimientos descritos por el HCM 2000.

4.5.2. Módulo de ajuste de volúmenes

En este módulo de análisis se lleva a cabo un ajuste a los volúmenes de tránsito observados en la intersección durante el período de los 15 minutos más críticos de la hora pico vespertina. Este ajuste se hace para tomar en cuenta el efecto aleatorio de las variaciones de los volúmenes dentro de una misma hora.

La selección del factor de hora pico es a criterio del analista, en este caso particular se tomó en cuenta el valor recomendado por el **Manual de capacidad de carreteras** de 0.92 para todos los movimientos, aunque este parámetro podría ser variable de un movimiento a otro.

En el caso del acceso norte (origen en la colonia Lourdes), se obtuvieron las tasas de flujo ajustadas al dividir los volúmenes de los vehículos que siguen de frente y los que cruzan a la derecha y a la izquierda. De esta manera se tiene:

Volumen cruce izquierda =	27 veh/h	$v = \frac{V_i}{FHP} = \frac{27}{0.92} \approx 29 \frac{veh}{h}$
Volumen de frente =	105 veh/h	$v = \frac{V_i}{FHP} = \frac{105}{0.92} \approx 114 \frac{veh}{h}$
Volumen de cruce a la derecha =	18 veh/h	$v = \frac{V_i}{FHP} = \frac{18}{0.92} \approx 19 \frac{veh}{h}$

De esta misma manera se procedió al cálculo de las tasas de flujo v para el resto de los accesos. Estos resultados se pueden observar en la figura 24 (Ver pág. 172)

A continuación se establecieron los grupos de carriles para el análisis de la operación del semáforo, según los lineamientos del **Manual de capacidad de carreteras**. Una de las principales recomendaciones es analizar las intersecciones con el menor número de grupos de carriles que pueda describir correctamente los movimientos vehiculares.

En el acceso sur (origen en la zona 5) en la hora pico vespertina se observa que el carril izquierdo es usado en forma predominante por los conductores que se dirigen a la izquierda, por lo tanto, este carril no cumple con las condiciones de equilibrio de un carril compartido con movimientos de frente y de cruce a la izquierda sino que se considera en este período de análisis como un carril exclusivo de cruce a la izquierda y para su análisis se considera un grupo aparte. Los movimientos de frente y de cruce a la derecha se analizan en otro grupo.

En el resto de los accesos se reúnen los dos carriles existentes en un solo grupo por si se verifica la condición de equilibrio entre los diferentes movimientos.

En el acceso oeste (origen en la calzada de La Paz) solamente se consideran los movimientos de frente y a la izquierda, ya que el movimiento a la derecha no experimenta demoras por el semáforo.

4.5.3 . Módulo flujo de saturación

El flujo de saturación se puede obtener directamente por observación de campo o bien siguiendo la metodología del análisis operacional. Los resultados de la aplicación del método se resumen en la figura 24.

El método asume como valor de flujo de saturación ideal la cantidad de 1,900 vehículos livianos por hora por carril. A continuación, se anotaron en la hoja de cálculo (Fig. 4.12) los factores de ajuste correspondientes:

Por ejemplo para el acceso este, se aplicaron los siguientes factores de ajuste:

Número de carriles $N = 2$

Factor ancho de carril $f_w = 1 + \frac{w - 3.6}{9} = 1 + \frac{3.6 - 3.6}{9} = 1.0 \quad (4.1)$

Factor ajuste % de Vehículos pesados $f_{HV} = \frac{100}{100 + \%HV(E_t - 1)} = \frac{100}{100 + 5.41 * (2 - 1)} = 0.949 \quad (4.2)$

$E_t =$ factor de vehículo liviano equivalente = 2.0

Ajuste pendiente del acceso $f_g = 1 - \frac{\%G}{200} = 1 - \frac{-5.88}{200} = 1.029 \quad (4.3)$

$$-6 \leq \%G \leq +10$$

Factor parqueo $f_p = 1.0$

Por definición el factor de parqueo toma este valor, ya que es distinta un área en donde se permita el parqueo y el número de maniobras es 0 que un área donde no se permite estacionamiento.

Factor buses que hacen paradas $f_{bb} = \frac{N - \frac{14.4Nb}{3600}}{N} = \frac{2 - \frac{14.4 * 0}{3600}}{2} = 1.0 \quad (4.4)$

Factor área $f_a = 1.0$

El factor de ajuste de área toma este valor por ser área no comercial

Factor utilización del carril $f_{uc} = \frac{v_g}{v_{g1} * N} = \frac{42 + 69 + 46}{(46 + 35) * 2} = 0.976 \quad (4.5)$

v_g es la tasa de flujo no ajustada del grupo de carriles.

v_{g1} es la tasa de flujo del carril de mayor volumen dentro del grupo

Factor de vuelta a la izquierda $f_{vi} = \frac{1}{1 + 0.05P_{vi}} = \frac{1}{1 + 0.05 * 0.268} = 0.987$ (4.6)

Factor de vuelta a la derecha $f_{vd} = 1 - 0.15P_{vd} = 1 - 0.15 * 0.292 = 0.956$ (4.7)

Factor bloqueo de peatones / bicicletas izquierda $f_{bpb_i} = 1.0$

Factor bloqueo de peat. / bic. derecha $f_{bpb_d} = 1.0$

Los factores de bloqueo de peatones / bicicletas se toman igual a la unidad debido a que los flujos peatonales son tan bajos que su efecto es despreciable para este análisis en particular.

El valor del flujo de saturación para este acceso es:

$$s = s_0 * N * f_w * f_{VP} * f_g * f_p * f_{bb} * f_a * f_{uc} * f_{vi} * f_{vd} * f_{bpb_i} * f_{bpb_d} \quad (4.8)$$

$$s = 1900 * 2 * 1.0 * 0.949 * 1.029 * 1.0 * 1.0 * 1.0 * 0.976 * 0.987 * 0.956 * 1.0 * 1.0$$

$$s = 3419 \text{ vehículos por hora luz verde}$$

Para el resto de los accesos se aplicó el mismo procedimiento, se obtuvo para cada uno de ellos su respectiva tasa de flujo de saturación s.

Figura 24 Hoja de cálculo ajuste de volúmenes y tasa de flujo de saturación

HOJA DE CÁLCULO AJUSTE DE VOLÚMENES Y TASA DE FLUJO DE SATURACIÓN														
Información general														
Descripción del proyecto: <u>Análisis operacional intersección Lourdes - La Paz Hora pico 19:00 - 20:00</u>														
Ajuste de volúmenes														
	Norte			Sur			Este			Oeste				
	I	F	D	I	F	D	I	F	D	I	F	D		
Volumen, V (veh/h)	27	105	18	341	107	39	42	69	46	29	44	*		
Factor de hora pico FHP	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92		
Tasa de flujo ajustada, $v_p=V/FHP$	29	114	19	370	116	42	45	74	49	31	48			
Grupo de carriles														
Tasa de flujo grupo carriles, v (Veh/h)	163			370			158			169			79	
Proporción de vuelta (Pvi) o (Pvd)	0.179			0.117			0.265			0.268			0.292	0.394
Tasa de flujo de saturación														
Flujo de saturación base so (vl/h/carril)	1900	1900	1900	1900	1900	1900	1900	1900	1900	1900	1900	1900		
Número de carriles, N	2			1			2			2				
Factor de ajuste ancho de carril fa	1			1			1			1				
Factor de ajuste vehículo pesado, fVP	0.955			0.945			0.945			0.949			0.952	
Factor de ajuste pendiente, fg	1.026			0.989			1.026			1.029			0.957	
Factor de ajuste parqueo, fp	1			1			1			1			1	
Factor de ajuste por bloqueo buses, fbb	0.988			1			0.976			1			1	
Factor de ajuste tipo de área, fA	1			1			1			1			1	
Factor de ajuste utilización de carril, fuc	0.942			1			1			0.976			0.717	
Factor de ajuste por cruce izquierda., fvi	0.991			0.95			1			0.987			0.981	
Factor de ajuste por cruce derecha., fvd	0.982			1			0.96			0.956			1	
Factor peat. /bici. izquierda fpb i	1			1			1			1			1	
Factor peat. /bici. derecha, fpb d	1			1			1			1			1	
Tasa de flujo de sat. ajustada, s (veh/h)	3373			1687			1727			3419			2433	
s=so N fa fvp fg fp fbb fA fvi fvd fpci fpbd														
Notas: * El movimiento de cruce a la derecha Calzada de La Paz - zona 5 no experimenta demora por el control del semáforo														

4.5.4 . Análisis de capacidad

En este módulo de análisis se determinó la capacidad de la intersección y de sus accesos. Estos datos se pueden apreciar en la hoja de cálculo de la figura 26.

Por ejemplo, en el acceso oeste (origen en la Calzada de La Paz) con los datos de la tasa de flujo ajustada para el grupo de carriles v y su respectiva tasa de flujo de saturación se estimó la capacidad del grupo de carriles seleccionado, se siguió el procedimiento que se presenta a continuación:

1. Se estimó el tiempo perdido del acceso mediante la fórmula:

$$t_L = I_1 + Y - e = 5 + 3 - 2 = 6(seg) \quad (4.9)$$

Donde:

- tL = tiempo perdido por acceso
- I1 = tiempo perdido por inicio de marcha de los vehículos
- Y = tiempo de luz amarilla
- e = porción de amarillo donde aún los vehículos atraviesan la intersección

2. Cálculo de verde efectivo

$$g = G + Y - t_L = 15 + 3 - 6 = 12(seg) \quad (4.10)$$

Donde:

- g = tiempo de verde efectivo (seg.)

G = duración de tiempo de luz verde (seg.)

Y = amarillo (seg.)

t_L = tiempo perdido del acceso (seg.)

3. La relación de verde g/C:

$$\frac{g}{C} = \frac{12}{212} = 0.057 \quad (4.11)$$

Donde:

C es la duración del ciclo del semáforo (seg.)

4. La capacidad del grupo de carriles se calculó mediante la siguiente expresión:

$$c = s \left(\frac{g}{C} \right) = 2433 * 0.057 = 138(\text{veh}/h) \quad (4.12)$$

5. El grado de saturación del grupo de carriles X, es la relación de volumen v a capacidad c:

$$X = \frac{v}{c} = \frac{79}{138} = 0.57 \quad (4.13)$$

6. La relación de flujo y_i es el cociente de la capacidad dividida por el flujo de saturación del grupo de carriles:

$$y_i = \frac{v}{s} = \frac{79}{2433} = 0.032 \quad (4.14)$$

Al aplicar este mismo procedimiento se procedió a calcular la capacidad de cada uno de los grupos de carriles que se analizan.

A continuación se determinó la capacidad de toda la intersección, para lo cual se deben seleccionar los grupos de carriles críticos, que son los grupos de carriles con la relación de flujo (v/s) más alta para una fase dada del semáforo.

El semáforo presenta cuatro fases, cada una de las cuales tendrá asociada un grupo de carriles crítico que determinará los requerimientos de tiempo verde.

La suma de las relaciones de flujo críticas está dada por la fórmula:

$$Y_c = \sum \left(\frac{v}{s} \right)_{ci} = 0.048 + 0.22 + 0.050 + 0.032 = 0.349 \quad (4.15)$$

En seguida se determina el tiempo perdido total por ciclo, L:

$$L = \sum t_{Li} = t_{LNorte} + t_{LSur} + t_{LEste} + t_{LOeste} = 6 + 6 + 6 + 6 = 24(seg.) \quad (4.16)$$

La relación v/c crítica para la intersección denominada Xc se calcula mediante la siguiente expresión:

$$X_c = Y_c * \frac{C}{C - L} = 0.349 * \frac{212}{212 - 24} = 0.394 \quad (4.17)$$

Este valor significa que en la hora pico vespertina la intersección funciona a menos del 40% de su capacidad.

4.5.5. Efectos de una cola inicial

Antes de proceder a estimar el nivel de servicio de cada uno de los accesos y de la intersección, es necesario tomar en cuenta los efectos que tiene la presencia de una cola al inicio del período de análisis sobre la demora que experimentan los vehículos debido al control del semáforo.

Para demostrar la aplicación del modelo de cola inicial se desarrollará el ejemplo del grupo de carriles de cruce a la izquierda del acceso sur (movimiento de la zona 5 a la calzada de La Paz).

Los datos para iniciar el análisis son el período de análisis T , la longitud del ciclo C , el tamaño de la cola inicial Q_b , la relación g/C , el grado de saturación X y la capacidad del grupo de carriles c .

El primer paso es determinar el tiempo t en que la demanda de la cola inicial es satisfecha, para lo cual se aplica la siguiente expresión:

$$t = \min \left\{ T, \frac{Q_b}{c[1 - \min(1, X)]} \right\} = \min \left\{ 0.25, \frac{26}{812 * \min(1, 0.456)} \right\} = 0.059 \quad (4.18)$$

Para este movimiento en particular se puede observar las siguientes condiciones:

1. $Q_b > 0$
2. $X \leq 1.0$
3. $t < T$

Éstas son las condiciones del caso III del modelo de cola inicial, por lo que se procede a calcular la demora uniforme d_1 y la demora por cola inicial d_3 con las fórmulas:

$$d_1 = 0.5C \left(1 - \frac{g}{C}\right) \left(\frac{t}{T}\right) + \frac{0.5C \left(1 - \frac{g}{C}\right)^2}{1 - \frac{g}{C} * \min(1, X)} \left[\frac{T-t}{T}\right] * PF \quad (4.19)$$

$$d_1 = 0.5 * 212(1 - 0.481) \left(\frac{0.059}{0.25}\right) + \frac{0.5 * 212(1 - 0.481)^2}{1 - 0.456 * \min(1, 0.456)} \left[\frac{0.25 - 0.059}{0.25}\right] * 1.0$$

$$d_1 = 49.53(seg)$$

PF es el factor de progresión que, por tratarse de una intersección, toma el valor de la unidad.

$$d_3 = \frac{1800Q_b t}{cT} = \frac{1800 * 26 * 0.059}{812 * .25} \quad (4.20)$$

$$d_3 = 13.59(seg)$$

Los resultados de este modelo se resumen en la hoja de cálculo de la Figura 25.

Figura 25 Hoja de cálculo cola inicial

HOJA DE CÁLCULO COLA INICIAL										
Información general										
Descripción del proyecto: <u>Análisis operacional intersección Lourdes - La Paz</u> Hora pico <u>19:00 - 20:00</u>										
Período (i)	<u>1</u>				Duración período de análisis, T			<u>0.25</u>		h
					Longitud de ciclo, C			<u>212</u>		s
Acceso	Norte		Sur		Este		Oeste			
Grupo de carriles		IFD	I	FD		IFD		IF		
Cola inicial Q _b (veh)		17	26	19		0		0		
Relación de verde g/C		0.151	0.481	0.481		0.198		0.057		
X = v/c		0.319	0.456	0.19		0.25		0.57		
Capacidad grupo carriles c=s(g/C) (veh/h)		509	812	831		677		138		
Duración demanda no satisfecha en T (h)	$t = \min \left\{ T, \frac{Q_b}{c[1 - \min(1, X)]} \right\}$									
		0.049	0.059	0.028		0		0		
Caso		III	III	III		III		III		
Casos I y II (Q_b=0)										
Demora uniforme d ₁ es como se muestra en figura 17.x, demora por cola inicial d ₃ = 0										
Caso III (Q_b>0) (X ≤ 1.0) (t < T)										
$d_1 = 0.50C(1-g/C) \frac{t}{T} + \frac{0.5C(1-g/C)^2}{(1-g/C)\min(1, X)} \left[\frac{T-t}{T} \right] * PF$		97.94	49.53	37.62		71.71		97.49		
$d_3 = \frac{1800 Q_b t}{cT}$		11.79	13.59	4.649		0		0		
Caso IV (Q_b>0) (X ≤ 1.0) (t = T)										
$d_1 = 0.50C(1-g/C)$										
$u = 1 - \frac{cT}{Q_b} [1 - \min(1, X)]$										
$d_3 = 1800 Q_b / c(1+u)$										
Caso V (Q_b>0) (X > 1.0) (t = T)										
$d_1 = 0.5C(1-g/C)$										
$d_3 = 3600 Q_b / c$										

4.5.6. Módulo nivel de servicio

De acuerdo con el **Manual de capacidad de carreteras**, el nivel de servicio para intersecciones con semáforo está en función de la demora. Como ya se estudió en la sección 2.5.4, la demora tiene tres componentes que son la demora uniforme d_1 , el incremento de la demora d_2 y la demora por cola inicial d_3 .

$$d = d_1 * FP + d_2 + d_3 \quad (4.21)$$

Si se sigue con el ejemplo de la sección anterior para el movimiento zona 5 a la Calzada de La Paz, los componentes de la demora son los siguientes:

$$d_1 = 49.53(seg) \quad (4.22)$$

Para el cálculo de d_2 se aplica la siguiente expresión:

$$d_2 = 900T \left[(X - 1) + \sqrt{(X - 1)^2 + \frac{8kIX}{cT}} \right] \quad (4.23)$$

Donde:

- d_2 = incremento de la demora.
- T = período de análisis.
- X = grado de saturación del grupo de carriles.
- k = factor del modelo que depende del tipo de control del semáforo, para reflejar el tipo de equipo que está en funcionamiento.
- I = factor que refleja la influencia de semáforos cercanos.
- c = capacidad del grupo de carriles.

$$d_2 = 900 * 0.25 \left[(0.456 - 1) + \sqrt{(0.456 - 1)^2 + \frac{8 * 0.50 * 1.0 * 0.456}{812 * 0.25}} \right] \quad (4.24)$$

$$d_2 = 1.8(seg)$$

En la ecuación anterior $k = 0.5$, es de un semáforo de tiempo fijo o previamente programado. $l = 1.0$ porque se analiza una intersección aislada con los semáforos más cercanos, situados a más de 1 Km. de distancia.

$$d_3 = 13.59(seg), \text{ según los cálculos obtenidos en la sección 4.5.5}$$

Por lo tanto; la demora para el movimiento de la zona 5 a la calzada de La Paz está dada por la fórmula:

$$d = d_1 + d_2 + d_3 = 49.5 + 1.8 + 13.6 = 64.9(seg / veh) \quad (4.25)$$

Esta expresión d_1 ya había tomado en cuenta el factor de progresión FP.

De acuerdo con el **Manual de Capacidad de Carreteras**, este valor de demora corresponde al nivel de servicio E.

$$55 < d < 80$$

A continuación se determina la demora para cada acceso, mediante la ecuación:

$$d_A = \frac{\sum (d_i * v_i)}{\sum v_i} \quad (4.26)$$

Por ejemplo para el acceso sur, se tiene:

$$d_A = \frac{65.0 * 370 + 41.2 * 158}{370 + 158} = 57.9(seg), \text{ que corresponde a Nivel de Servicio E.}$$

Se determinó de esta manera la demora y el nivel de servicio para cada acceso.

Finalmente, para estimar el nivel de servicio de la intersección se calcula la demora de la intersección mediante la siguiente expresión:

$$d_I = \frac{\sum (v_{Ai} * d_{Ai})}{\sum v_{Ai}} = \frac{163 * 111.4 + (370 + 158) * 57.9 + 169 * 72.4 + 79 * 112.6}{163 + (370 + 158) + 169 + 79} \quad (4.27)$$

$d_I = 65.1seg$, que corresponde a nivel de servicio E.

Figura 26 Hoja de cálculo capacidad y nivel de servicio

HOJA DE CÁLCULO CAPACIDAD Y NIVEL DE SERVICIO						
Análisis de capacidad						
Descripción del proyecto: Análisis operacional Intersección Lourdes - La Paz Hora pico 19:00 - 20:00						
Acceso	Norte		Sur		Este	Oeste
Grupo de carriles						
Tasa de flujo ajustada v (veh/h)	163	370	158		169	79
Tasa de flujo saturación s (veh/h)	3373.1	1687.1	1726.8		3419.1	2433.3
Tiempo perdido $t_L = I_1 + Y - e$	6	6	6		6	6
Verde efectivo $g = G + Y - t_L$	32	102	102		42	12
Duración ciclo C	212	212	212		212	212
Relación de verde g/C	0.1509	0.4811	0.4811		0.1981	0.0566
Capacidad grupo carriles $c = s(g/C)$ (veh/h)	509	812	831		677	138
$X = v/c$	0.3192	0.4563	0.19		0.2499	0.5702
Tasa de flujo v/s	0.048	0.220	0.091		0.050	0.032
Grupo de carriles críticos <input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Suma de tasas de flujo de carriles críticos, $Y_c = \sum(v/s)c_i$	0.349			Tiempo perdido total por ciclo, L (s)		24
Relación de tasas de flujo críticas a capacidad, $X_c = Y_c * (C) / (C - L)$	0.3941					
Nivel de servicio						
Demora uniforme d_1 (ver Fig 17.x)	97.9	49.5	37.6		71.7	97.5
Factor ajuste progresión FP	1.0	1.0	1.0		1.0	1.0
Factor calibración incremento demora k	0.5	0.5	0.5		0.5	0.5
Incremento demora d_2	1.6	1.8	0.5		0.9	16.0
Demora cola inicial d_3 (Ver Fig. 17.x)	11.8	13.6	4.6		0.0	0.0
Demora $d = d_1 * FP + d_2 + d_3$	111.4	65.0	42.8		72.6	113.5
Nivel de servicio grupo de carriles	F	E	D		E	F
Demora acceso d_A	111.4	58.3			72.6	113.5
Nivel de servicio acceso	F	E			E	F
Tasa de flujo acceso v_A (veh/h)	163	528			169	79
Demora intersección d_i	65.41				NDS Intersección	E

4.5.7. Módulo extensión de colas

Como se describió en el capítulo 2, el módulo de extensión de colas se utiliza para estudiar los efectos de los fenómenos de espera en una intersección con semáforos.

Los cálculos de este módulo se basan en los parámetros por carril, en lugar de manejar grupos de carriles como se han trabajado los módulos anteriores.

A continuación se desarrollará como ejemplo de cálculo la extensión de colas para el grupo de cruce a la izquierda del acceso sur (movimiento zona 5-calzada de La Paz). Los resultados de este módulo pueden observarse en las Figuras 27 y 28.

El proceso se inicia con el dato de la cola inicial por carril al principio del período de análisis, Q_{bL} , el cual se determina por observación en campo. En este caso en un determinado ciclo dentro de la hora pico que se analiza, se contaron 26 vehículos. ($Q_{bL}=26$ veh.).

El flujo por carril es el flujo del grupo dividido por el número de carriles que forman el grupo.

$$v_L = \frac{v}{N} = \frac{370}{1} = 370 \text{ veh\u00edculos por hora} \quad (4.28)$$

El flujo de saturación y la capacidad por carril son respectivamente $s_L=1687$ veh\u00edculos por hora y $c_L=812$ veh/h.

Con estos datos, entonces, se calculan la relación de flujo y la relación de volumen de capacidad por carril.

$$\frac{v_L}{s_L} = \frac{370}{1687} = 0.219 \quad (4.29)$$

$$X_L = \frac{v_L}{c_L} = \frac{370}{812} = 0.456 \quad (4.30)$$

La relación de verde (U) no es más que la proporción de tiempo de luz verde dentro del ciclo del semáforo, en este caso en particular, $U=102/212=0.481$.

El factor de filtración (I), como se determinó en la sección anterior, toma el valor de la unidad por ser una intersección aislada.

La relación de grupo de vehículos, R_p , también es igual a la unidad debido a que el tipo de llegadas a la intersección es tipo 3, es decir, llegadas aleatorias. Cuando se tienen arterias o corredores urbanos, los vehículos tienden a llegar en grupos o pelotones de vehículos para lo cual debe determinarse cuál es el tipo de llegadas y la relación de grupo para cada caso.

El factor de ajuste por efectos del avance, PF_2 se determina mediante la siguiente fórmula:

$$PF_2 = \frac{\left(1 - R_p * \frac{g}{C}\right) \left(1 - \frac{v_L}{s_L}\right)}{\left(1 - \frac{g}{C}\right) \left[1 - R_p \left(\frac{v_L}{s_L}\right)\right]} \quad (4.31)$$

Debe notarse que $R_p=1$, PF_2 también es igual a uno.

El siguiente paso es calcular el primer término de la ecuación de extensión de colas, Q_1 .

$$Q_1 = PF_2 \frac{v_L \frac{C}{3600} (1-u)}{1 - \min(1, X_L)u} \quad (4.32)$$

La función matemática min devuelve el valor mínimo entre dos números, en este caso, toma el valor de 1 en caso que X_L sea mayor que la unidad y viceversa.

Al sustituir valores en la fórmula de Q_1 , se tiene

$$Q_1 = 1.0 * \frac{370 * \frac{212}{3600} * (1 - 0.481)}{1 - \min(1, 0.456) * 0.481} = 13.68 \text{vehículos} \quad (4.33)$$

Previo al cálculo del segundo término de la ecuación de extensión de colas, se necesita determinar el factor de incremento k_B y el parámetro z .

$$k_B = 0.12 * I * \left(\frac{s_L * g}{3600} \right)^{0.7} \quad (4.34)$$

$$k_B = 0.12 * 1.00 * \left(\frac{1687 * 102}{3600} \right)^{0.7} = 1.798$$

$$z = (X_L - 1) + \frac{Q_{bL}}{c_L * T} \quad (4.35)$$

T es el período de análisis en horas, al sustituir valores z toma el valor de:

$$z = (0.456 - 1) + \frac{26}{812 * 0.25} = -0.416 \quad (4.36)$$

$$Q_2 = 0.25c_L T \left\{ z + \left[z^2 + \frac{8k_B X}{c_L T} + \frac{16k_B Q_{bL}}{(c_L T)^2} \right]^{0.5} \right\} \quad (4.37)$$

Al introducir datos a esta fórmula se obtiene el valor del incremento de la cola Q2.

$$Q_2 = 0.25 * 812 * 0.25 \left\{ -0.416 + \left[(-0.416)^2 + \frac{8 * 1.798 * 0.456}{812 * 0.25} + \frac{16 * 1.798 * 26}{(812 * 0.25)^2} \right]^{0.5} \right\} \quad (4.38)$$

Por lo tanto, Q2= 2.885

La extensión de la cola para este movimiento Q, es igual a la suma de Q1 y Q2:

$$Q = Q1 + Q2 = 13.68 + 2.885 = 16.565$$

En la segunda parte de la tabla VI se determina el percentil de la extensión de colas y las tasas promedio y percentil de almacenamiento de colas.

A continuación, se determina el factor percentil de extensión de colas mediante la siguiente fórmula:

$$f_{B\%} = p_1 + p_2 * e^{\left(\frac{-Q}{p_3}\right)} \quad (4.39)$$

De la tabla VI para el percentil 90 $p_1=1.50$, $p_2=0.50$ y $p_3=5.0$

$$f_{B\%} = 1.50 + 0.50 * e^{\left(\frac{-16.565}{5}\right)} = 1.518 \quad (4.40)$$

El percentil de extensión de colas es:

$$Q_{\%} = f_{B\%} * Q \quad (4.41)$$

Para el ejemplo $Q_{90\%} = 1.518 * 16.565 = 25.149$, de acuerdo con la definición del percentil de colas, este valor significa que se espera que el 10% del tiempo la cola se extienda a 25 vehículos.

Finalmente, se calculan las tasas de almacenamiento promedio y percentil, para lo cual se necesita conocer el espaciamiento promedio entre los vehículos formados en la cola y la distancia disponible de almacenamiento de cola.

El espaciamiento promedio (L_h) en una cola estacionaria es la distancia medida entre puntos homólogos de dos vehículos consecutivos en la que se incluye la longitud del vehículo y el espacio vacío entre los vehículos.

La distancia disponible de almacenamiento (L_a) es la longitud del carril en metros.

La tasa promedio de almacenamiento es:

$$R_Q = \frac{L_h * Q}{L_a} = \frac{2.5 * 16.565}{100} = 0.414 \quad (4.42)$$

La tasa percentil de almacenamiento, la cual se estima como:

$$R_{Q\%} = \frac{L_h * Q\%}{L_a} = \frac{2.5 * 25.149}{100} = 0.629 \quad (4.43)$$

FIGURA 27 HOJA DE CÁLCULO EXTENSIÓN DE COLAS (Parte 1/2)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Acceso	N		S			E			W			
Grupo de carriles		IFD		I	FD			IFD			IF	
Cola inicial por carril al principio del período de análisis, Q_{bL}		17		26	19			0			0	
Flujo por carril v_L		81		370	158			85			39	
Flujo de saturación por carril s_L		1687		1687	1727			1710			1217	
Capacidad por carril c_L		255		812	831			339			69	
Relación de flujo v_L/s_L		0.048		0.220	0.091			0.181			0.032	
$X_L=v_L/c_L$		0.319		0.456	0.190			0.250			0.570	
Verde efectivo g		32		102	102			42			12	
Relación de verde $U=g/C$		0.151		0.481	0.481			0.198			0.057	
Factor de filtración		1.0		1.0	1.0			1.0			1.0	
Prop. de veh. en verde, P		1.0		1.0	1.0			1.0			1.0	
Relación de grupo de vehículos, R_p		1.0		1.0	1.0			1.0			1.0	
Factor de ajuste de efectos de avance PF_2		1.0		1.0	1.0			1.0			1.0	
Primer término ecuación longitud de cola Q_1		4.027		13.680	5.009			3.967			2.127	
Factor de incremento del segundo término k_B		0.798		1.798	1.828			0.975			0.320	
$z=X_L-1+Q_{bL}/(c_L T)$		-0.414		-0.416	-0.718			-0.750			-0.430	
Segundo término ecuación longitud de cola Q_2		1.481		2.885	0.937			0.322			0.384	
$Q=Q_1+Q_2$		5.507		16.565	5.946			4.289			2.511	
Proyecto: <u>Bulevar a la colonia Lourdes y Calzada de La Paz</u>								Fecha: <u>24-Abr-04</u>				
Analista: <u>LRAA</u>				Período de análisis <u>19:00 a 19:15</u>				Hoja No.:		/		

FIGURA 28 HOJA DE CÁLCULO EXTENSIÓN DE COLAS (Parte 2/2)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Acceso	N		S				E		W			
Grupo de carriles		IFD		I	FD			IFD			IF	
$Q=Q_1+Q_2$		5.507		16.565	5.946			4.289			2.511	
Percentil de extensión de colas		70%		85%		□90%		95%		98%		
p_1		1.50		1.50	1.50			1.50			1.50	
p_2		0.50		0.50	0.50			0.50			0.50	
p_3		5.00		5.00	5.00			5.00			5.00	
Factor percentil de extensión de colas $f_{B\%}$		1.666		1.518	1.652			1.712			1.803	
Percentil de extensión de colas $Q_{\%}=f_{B\%}*Q$		9.176		25.149	9.824			7.343			4.526	
Tasa de almacenamiento de colas												
Espaciamiento promedio en la cola L_h (m)		2.5		2.5	2.5			2.5			2.5	
Almacenamiento de cola disponible L_a (m)		100		100	100			100			100	
Tasa promedio de almacenamiento de colas R_Q		0.138		0.414	0.149			0.107			0.063	
Tasa percentil de almacenamiento de colas $R_{Q\%}$		0.229		0.629	0.246			0.184			0.113	
Proyecto: <u>Bulevar a la colonia Lourdes y Calzada de La Paz</u>								Fecha: <u>24-Abr-04</u>				
Analista: <u>LRAA</u>		Período de análisis			<u>19:00 a</u> <u>19:15</u>			Hoja No.: <u>/</u>				

4.6. Evaluación de funcionamiento de la intersección

En la sección anterior se determinó la capacidad y nivel de servicio de la intersección entre el bulevar a la colonia Lourdes – Calzada de La Paz. Para evaluar el funcionamiento de este cruce de vías, se consideran simultáneamente los resultados de estos módulos de análisis.

Según el análisis de capacidad, el grado de saturación crítico de la intersección, es $X_c = 1.04$, esto significa que la intersección presenta en la hora pico movimientos que sobrepasan la capacidad de la misma (demanda > oferta) esto es obvio para el movimiento origen zona 5 – destino Calzada de La Paz.

El nivel de servicio global de la intersección es tipo E (Sección 4.5.5), con demoras entre 40 y 60 segundos, que se consideran valores altos de demora en la intersección que la hacen susceptible al colapso del movimiento vehicular en la hora pico. En un futuro, es posible que el congestionamiento se disipe en un período de varias horas.

Por lo anteriormente analizado, y dada la capacidad insuficiente y valores intolerables de demora, se observa que el semáforo es insuficiente para regular el tránsito, ya que aún realizando un reordenamiento de la sucesión de fases y tiempos del semáforo, se requeriría una mayor longitud de ciclo que la actual. Los ciclos muy largos son contraproducentes ya que se presenta la tendencia del aumento de la demora en todos los movimientos.

La recomendación para mejorar las condiciones de circulación está encaminada a realizar cambios geométricos en la intersección, de acuerdo con los siguientes criterios:

- Alejar los puntos de conflicto entre sí.
- Mejorar las condiciones de visibilidad de parada.
- Considerar más carriles por tipo de movimiento (de acuerdo con el volumen de tránsito futuro).

5. CRITERIOS PARA DEFINIR OPCIONES DE DISEÑO

5.1. Descripción de opciones de diseño y análisis comparativo

En el capítulo anterior se llevó a cabo un análisis de capacidad y nivel de servicio, en el que se determinó que la intersección entre el bulevar a la Colonia Lourdes y la Calzada de La Paz presenta condiciones adversas de circulación vehicular tales como grandes demoras y formación de colas. En esta sección se considerarán algunas alternativas de solución, tomando como base para su diseño el comportamiento de los volúmenes de tránsito. Dentro de éstas, se pueden mencionar las siguientes:

5.1.1. Regular el tránsito por medio de semáforo

Como ya se mencionó en la sección 4.6, continuar el control de los movimientos vehiculares por medio de semáforos con la geometría actual, puede ocasionar el colapso, es decir, congestionamientos que pueden llegar a durar varias horas. Por esto se recomienda la modificación de la geometría de la intersección, de acuerdo con las opciones que se describen a continuación.

5.1.2 . Ampliación de las vías existentes

La primera opción para realizar cambios geométricos en la intersección, es la ampliación del ancho actual de los accesos, mediante la construcción de un tercer carril en cada uno de ellos, con lo cual se mejora la capacidad global.

Los movimientos vehiculares en esta solución siempre serán regulados por medio de un semáforo.

De acuerdo con el aforo de volúmenes de tránsito y según el procedimiento de análisis de intersecciones con semáforo, se pueden estimar sus tiempos de sucesión de fases.

Esta opción, sin embargo, tiene un gran inconveniente porque los puntos de conflicto entre los movimientos vehiculares persisten y la capacidad global de la intersección permanece limitada por la asignación de tiempos del semáforo.

5.1.3 . Plantear solución mediante pasos a nivel

En el planteo de soluciones mediante pasos a nivel, se pueden considerar efectuar trabajos de canalización y / o eliminar algunos movimientos de la intersección como sería la prohibición de cruces a la izquierda, los cuales se realizan desviando el tránsito a otras vías.

En el caso del presente análisis, debido a la geometría existente en la intersección, no puede pensarse en hacer canalizaciones para regular los movimientos vehiculares, ya que las pendientes de los accesos no permiten una adecuada visibilidad para maniobras.

En esta intersección ya existe un carril exclusivo para el movimiento zona 18 a zona 5 y existe la posibilidad de habilitar carriles exclusivos de cruce a la derecha en los tres movimientos restantes de este tipo.

En lo que se refiere a los cruces a la izquierda en el área no existe una red de calles que puedan utilizarse como desvíos aparte de que el cruce a la izquierda zona 5 - zona 18 en la hora pico vespertina, es uno de los movimientos con mayor volumen en esta intersección.

Por otro lado, los altos volúmenes de tránsito y su interacción indican que las señales de “alto” y “ceda el paso” serían insuficientes para la regulación del flujo vehicular.

Dentro de los pasos a nivel también están las intersecciones rotatorias que son intersecciones que disponen de una isleta central, circular y que permiten a los vehículos que penetran a la intersección por cualquiera de los ramales, abandonar la misma por el ramal elegido mediante un giro en el sentido contrario a las agujas del reloj alrededor de dicha isleta. La más común es la convencional, la cual es una rotonda que tiene una calzada de una vía, compuesta de secciones de entrecruzamientos, alrededor de una isla central circular, normalmente sin accesos ampliados; pueden ser de tres, cuatro o más accesos.

Para que una rotonda sea convencional, el diámetro de la isla central debe ser igual o superior a 25 metros. Las glorietas poco se emplean en carreteras, a no ser en zonas suburbanas o en cercanías a los pueblos.

Ventajas:

- Resuelven todos los movimientos, incluido el cambio de sentido.
- Reducen la peligrosidad, al disminuir la velocidad y el ángulo de intersección de los vehículos.
- Son fáciles de comprender ("vista una, vistas todas").
- Permiten controlar la velocidad de los vehículos.

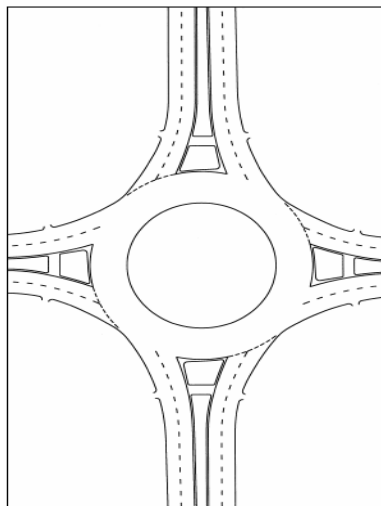
Inconvenientes:

- Aumentan los recorridos de los peatones y funcionan mal con presencia importante de éstos.
- Son peligrosas para ciclistas, si no existe itinerario especial para ellos.
- Requieren mayor ocupación de suelo.

Ámbito recomendado de aplicación

- Intersecciones de vías suburbanas y puntos de entrada a áreas urbanas y urbanizaciones.

Figura 29 Geometría de una rotonda con cuatro accesos



Fuente: *FDOT. Florida Intersection Design Guide For New Construction and mayor Reconstruction of At-Grade Intersections on the State Highway System.* Pág. II.20

5.1.4 . Distribuidores de tránsito a desnivel

Los cambios sugeridos en la geometría de la intersección implican la separación de los puntos de conflicto mediante la construcción de una o varias estructuras que permitan la circulación vehicular en distintos niveles.

Existe una gran variedad de opciones de solución que se incluyen dentro de esta categoría. Como ilustración, en los siguientes diagramas se muestran los esquemas de soluciones típicas, así como de las adaptaciones efectuadas a las condiciones de esta intersección. Los resultados de esta adaptación se muestran en los esquemas de las diferentes propuestas desarrolladas.

5.1.4.1. Pasos a desnivel

Un paso a desnivel es un sistema para interconectar dos o más vías formado por rampas y estructuras que permitan la separación de los diferentes movimientos de tránsito, de manera que los puntos de conflicto desaparezcan o se alejen entre sí. Según las políticas de diseño geométrico de carreteras de AASHO (*American Association of State Highway Officials*), la construcción de un paso a desnivel se justifica cuando se cumple una de las siguientes condiciones (1-534):

- Denominación del diseño, se refiere a las condiciones propias de las vías para que el flujo del tránsito se mantenga continuo.
- Eliminación de embotellamientos o congestionamientos puntuales, como se puede dar en algunas intersecciones a nivel con capacidad insuficiente para manejar los volúmenes de tránsito.

- Eliminación de peligros, la separación de nivel puede reducir de manera significativa los accidentes.
- Topografía local, en algunos proyectos en los que se tiene terrenos montañosos la separación de niveles reduce los costos de construcción.
- Beneficios para el usuario, por ejemplo cuando los costos de operación vehicular de una intersección a nivel se ven muy elevados por demoras excesivas, el paso a desnivel es la solución para reducirlos al evitar la circulación discontinua.
- Magnitud de los volúmenes de tránsito, al tener valores altos de flujo vehicular las intersecciones a nivel se saturan de tal manera que el congestionamiento puede durar varias horas por lo que se justifica la construcción de un paso a desnivel.

5.1.4.2. Tipos de intersección

Los intercambios o pasos a desnivel han sido desarrollados en orden de facilitar el flujo del tránsito, según sea el nivel al que se maneje el flujo de tránsito principal, éstos pueden ser superiores e inferiores.

Para tomar la decisión acerca de cuál de éstos es más conveniente para un proyecto en particular se deben comparar los costos de las estructuras de los pasos superiores contra los costos del movimiento de tierras de la vía de paso inferior o en corte.

Se pueden distinguir seis tipos principales de intersecciones, cada uno de ellos con diversas ventajas y desventajas, a continuación se hará una breve descripción de cada una de ellas.

5.1.4.2.1. Diamante

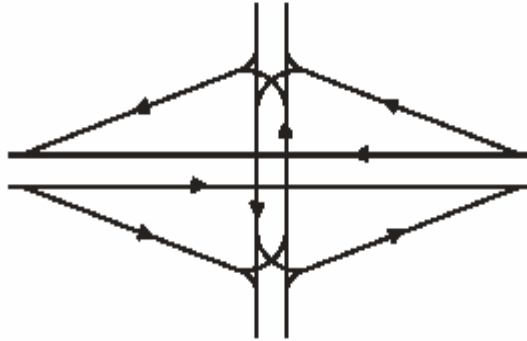
El paso a desnivel tipo diamante es el más simple, se coloca en una intersección de dos vías en la que una tiene mayor volumen de tránsito que la otra, se denomina como vía principal la de flujo más grande mientras que la otra es la secundaria.

Puede usarse, tanto en zonas rurales como en urbanas y consiste en cuatro rampas diagonales con movimiento en un solo sentido, cada una de las cuales se coloca en un cuadrante. El diagrama de circulación representado en la figura 1 muestra la distribución de los movimientos en un diamante.

Se compone de dos intersecciones con semáforos coordinados entre sí cada uno con tres fases, los cruces a la izquierda tienen radios de giro pequeños, esta configuración hace que las demoras de los movimientos internos sumen $1/3$ de la demora total de la intersección (13-85). Por otro lado; su capacidad se ve restringida por la capacidad de los cruces a nivel en la parte final de las rampas.

Generalmente, se usan en donde los volúmenes de tránsito de la vía secundaria no se espera que crezcan considerablemente.

Figura 30 Intersección tipo diamante



Fuente: *AASHO. A Policy on Design of urban Highways and arterial Streets*. Pág. 589

Ventajas

- Requiere un espacio angosto del derecho de vía.
- Su uso es apropiado en cruces de calles o caminos en los que una tiene mucho mayor volumen de tránsito que la otra, en donde los cruces a la izquierda son relativamente bajos.
- La operación vehicular se da en velocidades altas y se tienen movimientos directos a la derecha.
- Son alrededor de un 10 aun 20% más económicos que las intersecciones de un solo punto.

Desventajas

- Es posible entrar a las rampas en contra de vía, por lo que debe asegurarse de colocar una buena señalización para prevenir este problema.
- Se requiere el uso de semáforos en las dos intersecciones cuando se tienen volúmenes altos y deben coordinarse muy bien para maximizar el flujo del tránsito en las dos vías.

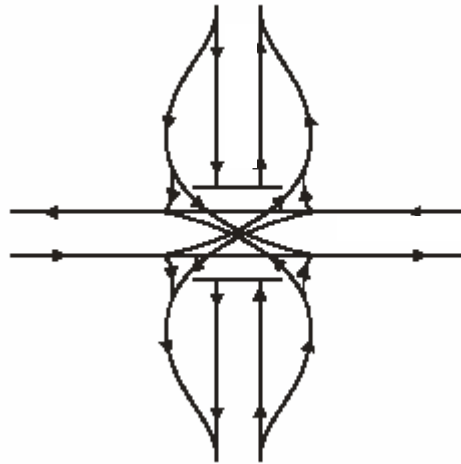
- El impedimento más grande de los diamantes para suavizar la operación vehicular es el manejo del tránsito que vira a la izquierda proveniente de la vía secundaria, ya que los vehículos se ven forzados a buscar brechas de paso para incorporarse a la corriente de tránsito, si se presentan altos volúmenes se requiere de semáforo de fases múltiples.
- Cuando el tránsito de los accesos es entre moderado y alto, usualmente, se requiere el uso de semáforos, para estos casos también debe estudiarse la capacidad de las rampas y decidir si éstas serán de uno o más carriles.
- Pueden ocurrir conflictos en las uniones de las salidas de las rampas con las vías principales o secundarias, esto reduce la capacidad y los niveles de servicio esperados.

5.1.4.2.2. Intersección urbana de un solo punto

Este tipo de paso a desnivel es de uso relativamente nuevo en su diseño y fue creado para minimizar el derecho de vía requerido, por esto es particularmente atractivo para usarlo en zonas urbanas. Son similares a los diamantes pero, únicamente, se necesita una intersección con semáforo. (13-93)

Los radios de giro a la izquierda son más amplios que los diamantes, esto permite velocidades más altas. Por esta configuración tienden a ocupar mayor espacio del derecho de vía que los diamantes.

Figura 31 Intersección urbana de un solo punto



Fuente: Nicholas J. Garber and Michael D. Fontaine. *Guidelines for Preliminary Selection of the Optimum Interchange Type for a Specific Location*. Pág. 70

Ventajas

- Pueden construirse en un espacio relativamente confinado, que reduce los costos del derecho de vía.
- La coordinación de semáforos, cuando la intersección forma parte de un corredor urbano, se hace más fácil debido a que solo se diseñan los tiempos de una unidad.
- Pueden servir mayores volúmenes de tránsito en cruces a la izquierda.

Desventajas

- Aunque se reducen los costos de derecho de vía, los costos de construcción pueden incrementarse debido a que se requiere una estructura con una luz muy larga cuando se tienen pasos superiores, mientras que en pasos inferiores resulta en un puente con forma de

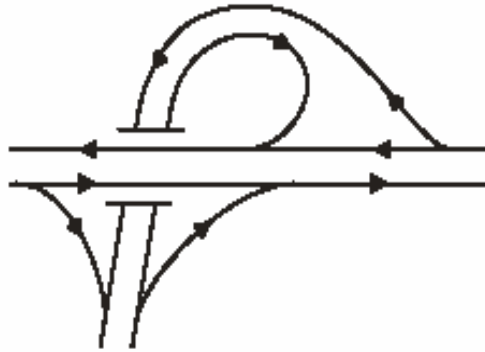
mariposa. Estos dos tipos de estructura pueden tener potencialmente un costo elevado.

- En caso de que las vías que se cruzan lo hagan en un ángulo severamente agudo, las distancias de visibilidad y de despeje de la intersección se ven afectadas en forma negativa.
- El paso de los peatones es difícil de manejar y si en el diseño de los tiempos del semáforo se considera una fase para el flujo de personas, la operación de la intersección se ve considerablemente disminuida.
- Al tiempo necesario para que se despeje la intersección se le debe prestar mucha atención debido a la gran longitud de la intersección.
- Como su diseño es relativamente nuevo la falta de familiaridad de los conductores puede causar accidentes.

5.1.4.2.3. Intersección tipo trompeta

Este tipo de intersección es recomendable cuando dos caminos se encuentran en forma de "T". El tránsito que sigue recto debe ser colocado en un alineamiento directo, mientras que el movimiento de cruce a la izquierda con el volumen más bajo debe viajar en la rampa curva. La figura 31 muestra un ejemplo de una intersección tipo trompeta. Son utilizadas exclusivamente cuando se tienen tres ramales. (1-584)

Figura 32 Intersección tipo trompeta



Fuente: AASHO. A *Policy on Design of urban Highways and arterial Streets*. Pág. 586

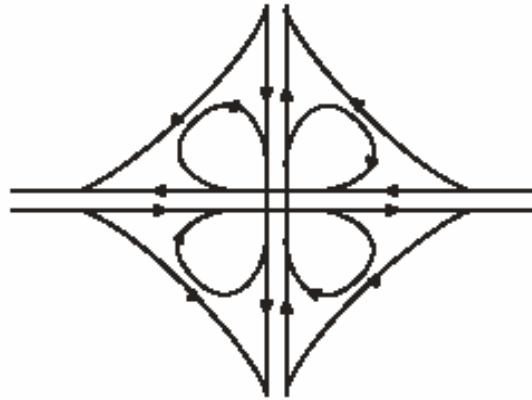
5.1.4.2.4. Tréboles completos

Los tréboles son intersecciones de cuatro accesos que usan rampas circulares (pétalos) para facilitar los movimientos de cruce a la izquierda.

Los tréboles tienen algunas ventajas sobre los otros tipos de intersección porque permiten todos los cruces a la izquierda al proveerles rampas curvas. La figura 4 muestra un ejemplo de un trébol completo. Esto evita los problemas de seguridad que se dan en los cruces a nivel que se forman en los diamantes. Permiten el flujo libre en todas las direcciones, sin ningún control adicional del tránsito (solo se rige mediante altos y ceda el paso).

Los tréboles ofrecen una solución más económica que las intersecciones direccionales que serán descritas mas adelante.

Figura 33 Trébol completo



Fuente: AASHO. A *Policy on Design of urban Highways and arterial Streets*. Pág. 594

Hay algunas desventajas al utilizar el diseño de los diamantes. El uso de rampas curvas consume una gran cantidad del derecho de vía ya que, a medida que la velocidad de diseño se incrementa, el espacio ocupado por la rampa será mucho mayor.

Se generan maniobras de entrecruzamiento para las que se dispone de una distancia muy corta para manejarlas. Cuando se utilizan carriles colectores y distribuidores se produce el entrecruzamiento en la línea principal.

Se ha determinado que el entrecruzamiento puede causar reducción de la velocidad e interferencia cuando la suma del tránsito que viene en el camino principal y el de la curva es mayor de 1000 vehículos por hora.

Si se da esta situación, AASHO recomienda la construcción de carriles auxiliares para reducir el impacto de las maniobras de entrecruzamiento en la línea principal del tránsito. Los niveles de servicio en estas áreas también tienden a ser más bajos que para otros componentes de la intersección.

El cruce a la izquierda se puede ver afectado al tener volúmenes de tránsito altos cuando los pétalos se proyectan para operar con un solo carril porque las curvas tienen radios pequeños.

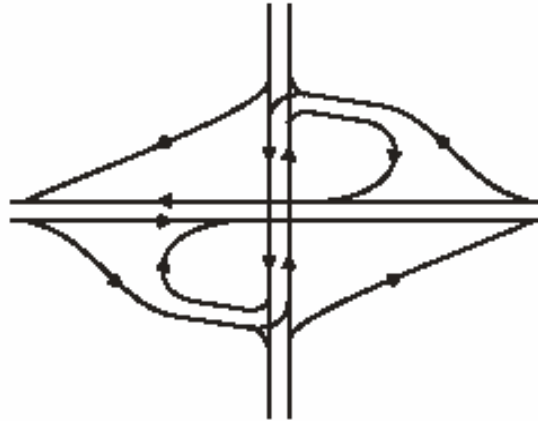
Estos inconvenientes hacen que los tréboles sean menos deseables en zonas urbanas debido a los problemas asociados con las secciones de entrecruzamiento y, sobre todo, cuando se tienen altos volúmenes de tránsito ya que hay que considerar carriles colectores y distribuidores así como mayor distancia entre las rampas.

Para lograr esto se requiere una gran cantidad de derecho de vía, lo que hace que en área urbana esto salga muy caro. Se ha encontrado que para la mayoría de casos los tréboles sean aplicados en áreas urbanas con bajos movimientos de cruce.

5.1.4.2.5. Trébol parcial

La configuración de este tipo de intersección es similar a la del trébol completo, excepto que los pétalos están presentes en tres cuadrantes o menos. Generalmente, se usa cuando no se dispone del derecho de vía en uno de los cuadrantes o cuando el tránsito que hace un movimiento en particular es mucho más pequeño comparado con los demás.

Figura 34 Trébol parcial de dos pétalos



Fuente: AASHO. A *Policy on Design of urban Highways and arterial Streets*. Pág. 594

Las rampas deben ser colocadas de manera que sus entradas y salidas causen el menor impacto posible en la vía principal. Específicamente, si los volúmenes en ésta son mucho mayores que en la vía secundaria para acomodar los movimientos de cruce a la derecha, se deben crear bahías en las entradas y salidas. (1-592)

Los tréboles parciales se utilizan principalmente donde las necesidades de los accesos, el derecho de vía y la red vial controlan la configuración de la intersección. Sufren muchas de las desventajas del trébol completo en lo referente a los pétalos y áreas de entrecruzamiento.

5.1.4.2.6. Intersecciones direccionales

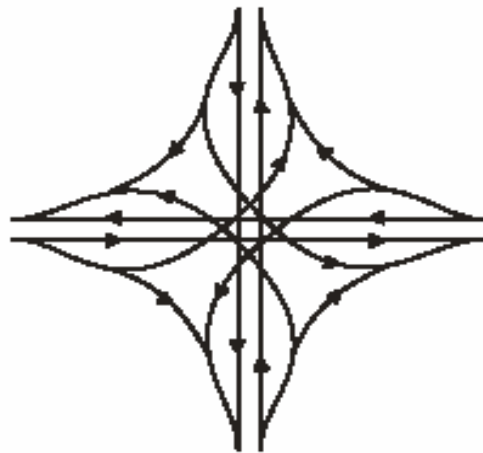
Son aquellas que utilizan conexiones directas o semi directas para uno o más movimientos de cruce a la izquierda.

Este tipo de intersección se proyecta cuando el volumen de tránsito de los cruces a la izquierda es tan alto como el del movimiento de seguir de frente. (1-593)

Existen muchos esquemas de intersecciones direccionales que utilizan la combinación de rampas direccionales, semi direccionales y pétalos.

Ofrecen la capacidad más alta que cualquiera de las otras soluciones, pero a mayor costo, ya que se necesitan una o varias estructuras.

Figura 35 Intersección completamente direccional



Fuente: *AASHO. A Policy on Design of urban Highways and arterial Streets.* Pág. 600

Hay algunas ventajas para utilizarlas porque permiten reducir la distancia de viaje, la capacidad y velocidad de operación se incrementan, el entrecruzamiento se elimina y desaparece la confusión de los conductores de moverse por curvas cerradas. Por todo esto, se le prefiere al trébol, pero los costos del derecho de vía y de construcción son onerosos.

Existen dos tipos principales de este tipo de intersección, que son las de conexión directa y las direccionales. Una conexión directa es un carril que no se desvía mucho de la dirección que se pretende alcanzar. Las direccionales se clasifican en semi direccionales y completamente direccionales, éstas últimas utilizan conexiones directas para todos los cruces a la izquierda. Las intersecciones semi direccionales combinan conexiones directas para los movimientos más fuertes y uno o varios pétalos para otros movimientos.

5.1.4.3. Selección del tipo de intersección

La selección del tipo de intersección es el primer y más importante paso en el diseño, se efectúa basándose en la experiencia y criterio del ingeniero, pero puede resultar un proceso largo y caro.

Debido a las características específicas de cada proyecto, adaptar un diseño ideal no siempre es factible. Se pueden dar indicaciones generales del tipo preliminar de intersección evaluado, pero las condiciones específicas se tienen que estudiar. Estas se refieren a la topografía, uso de la tierra, volúmenes de tránsito, densidades de población, valuación económica de la tierra y la disponibilidad de financiamiento. (14-45)

A continuación se dan algunas indicaciones generales para la selección del tipo de intersección.

5.1.4.3.1. Disponibilidad del derecho de vía

- Cuando se dispone de un derecho de vía limitado, los tipos de intersección más apropiados son el diamante y los entronques de un solo punto.

- En situaciones de restricción del derecho de vía en uno o varios cuadrantes se debe considerar el diseño de un trébol parcial.
- Los tréboles ocupan una gran cantidad del derecho de vía, por lo que no se les considera tan apropiados para áreas urbanas donde el valor de la tierra puede ser muy alto.
- Las intersecciones direccionales requieren el mayor espacio del derecho de vía y se justifican solamente cuando se intersecan dos autopistas.

5.1.4.3.2. Costos de construcción

- Los costos de una intersección son muy específicos. La topografía, el uso de la tierra y las consideraciones ambientales pueden hacer que dos soluciones similares tengan costos finales muy diferentes.
- En términos generales, los diamantes son más baratos de construir debido a su pequeña estructura y al poco derecho de vía que se requiere.
- Los entronques direccionales son onerosos y solo se justifican cuando se requiere altas velocidades y gran capacidad vial, en el medio guatemalteco son poco factibles de construir por el costo tan elevado.

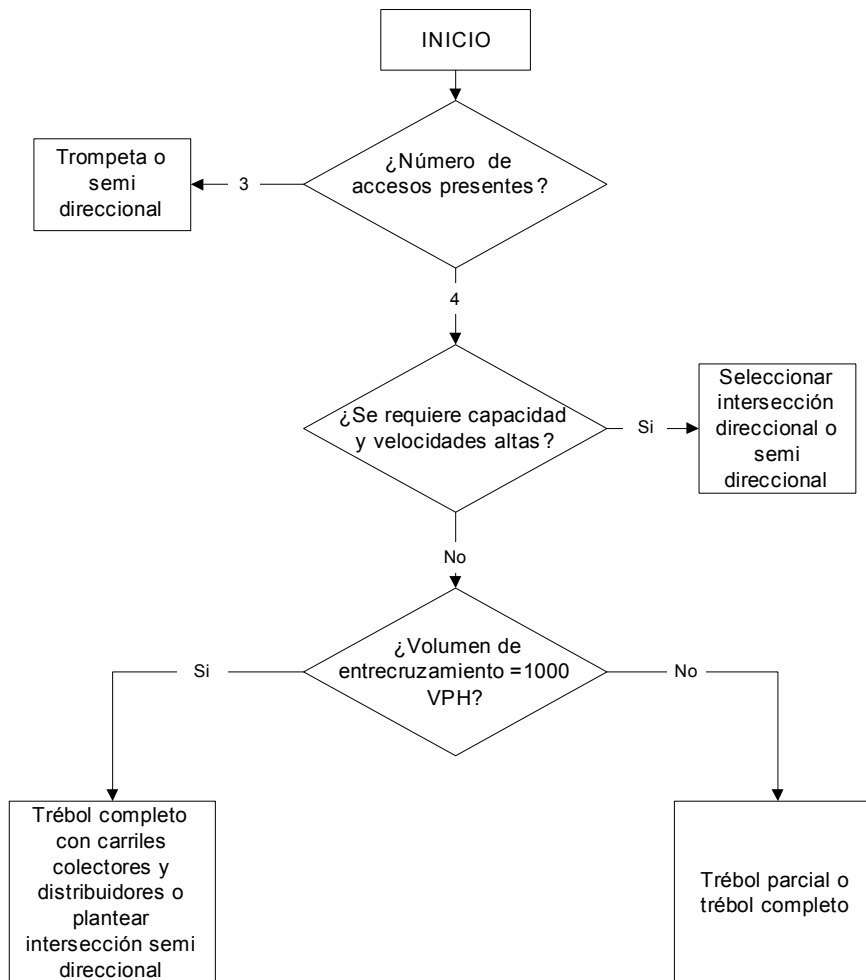
5.1.4.3.3. Criterios de operación vehicular

- Si la intersección tiene tres accesos se recomienda la intersección tipo trompeta.

- Cuando se requiere coordinación de un corredor urbano, se deben considerar las intersecciones de un solo punto puesto que son más sencillas de adaptar al sistema que los diamantes. (14-62)
- En áreas rurales en las que el derecho de vía no es tan problemático y donde se presentan volúmenes bajos de tránsito, se pueden utilizar los tréboles completos sin carriles colectores y distribuidores.
- Los diamantes se pueden proponer en proyectos con bajos volúmenes (debajo de 1500 veh/h), en estos casos, las demoras son bajas aún en sistemas sin semáforo.
- En los casos en que el volumen de entrada está en el rango de 1500 a 5500 Veh /h, se sugiere utilizar intersecciones de un solo punto en lugar del diamante, porque genera mayor demora por la configuración de doble intersección.
- El trébol parcial tiene mayor capacidad y se observan menores demoras que en las intersecciones de un solo punto y las de diamante cuando los volúmenes que son del orden de 1500 a 2500 vehículos por hora.
- El manejo de las operaciones de entrecruzamiento con altos volúmenes de tránsito es el componente crítico de los tréboles parciales y completos ya que el nivel de servicio comienza a declinar cuando los volúmenes en conflicto andan en el orden de 1000 veh/h. En este caso, se sugiere la construcción de carriles colectores y distribuidores en cada cuadrante.

- En áreas urbanas los volúmenes y los patrones de comportamiento del tránsito tienden a cambiar dramáticamente en períodos cortos, por lo que se recomienda que los tiempos de los semáforos sean aprovechados para minimizar la demora.

Figura 36 Selección preliminar de un paso a desnivel en la intersección de dos vías principales.



Fuente: *Nicholas J. Garber and Michael D. Fontaine. Guidelines for Preliminary Selection of the Optimum Interchange Type for a Specific Location.* Pág. 70

5.2. Propuestas de intersección

En la sección anterior se han descrito de manera general las posibles soluciones que pueden ser aplicadas al problema de la intersección de la calzada de La Paz y el bulevar Lourdes.

Las propuestas que aquí se desarrollarán están orientadas a privilegiar los movimientos de mayor volumen.

5.2.1 . Viaducto zona 5 – Calzada de La Paz

Como primera propuesta de solución se plantea la construcción de un viaducto para separar únicamente el movimiento con mayor volumen, que es el cruce a la izquierda de zona 5 a Calzada de la Paz.

Para este propósito se construiría un paso inferior o en trinchera, en el que los vehículos que van de zona 5 a la Calzada de la Paz pasarían por debajo del bulevar a Lourdes. El inicio del viaducto estaría adyacente al carril derecho de la pista con vía de sur a norte y terminaría antes de la entrada a la aldea Las Vacas.

También existe la alternativa de desarrollar la excavación en el carril izquierdo de la pista pero esto crearía un punto de conflicto entre los vehículos provenientes del Colegio Austriaco y siguen de frente a la calzada de La Paz con el tránsito que entra a la aldea Las Vacas.

El resto de los movimientos sería controlado con semáforo sincronizado sin incluir los movimientos La Paz a Zona 5 y Zona 5 a Calzada de La Paz, pero dejando separación de tiempos para los cruces a la izquierda en Austriaco-Zona 5, Calzada de La Paz a Lourdes y Lourdes – Austriaco.

El número de carriles para cada movimiento se puede determinar con el siguiente criterio

$$N = \frac{V}{750} \quad (5.1)$$

Donde:

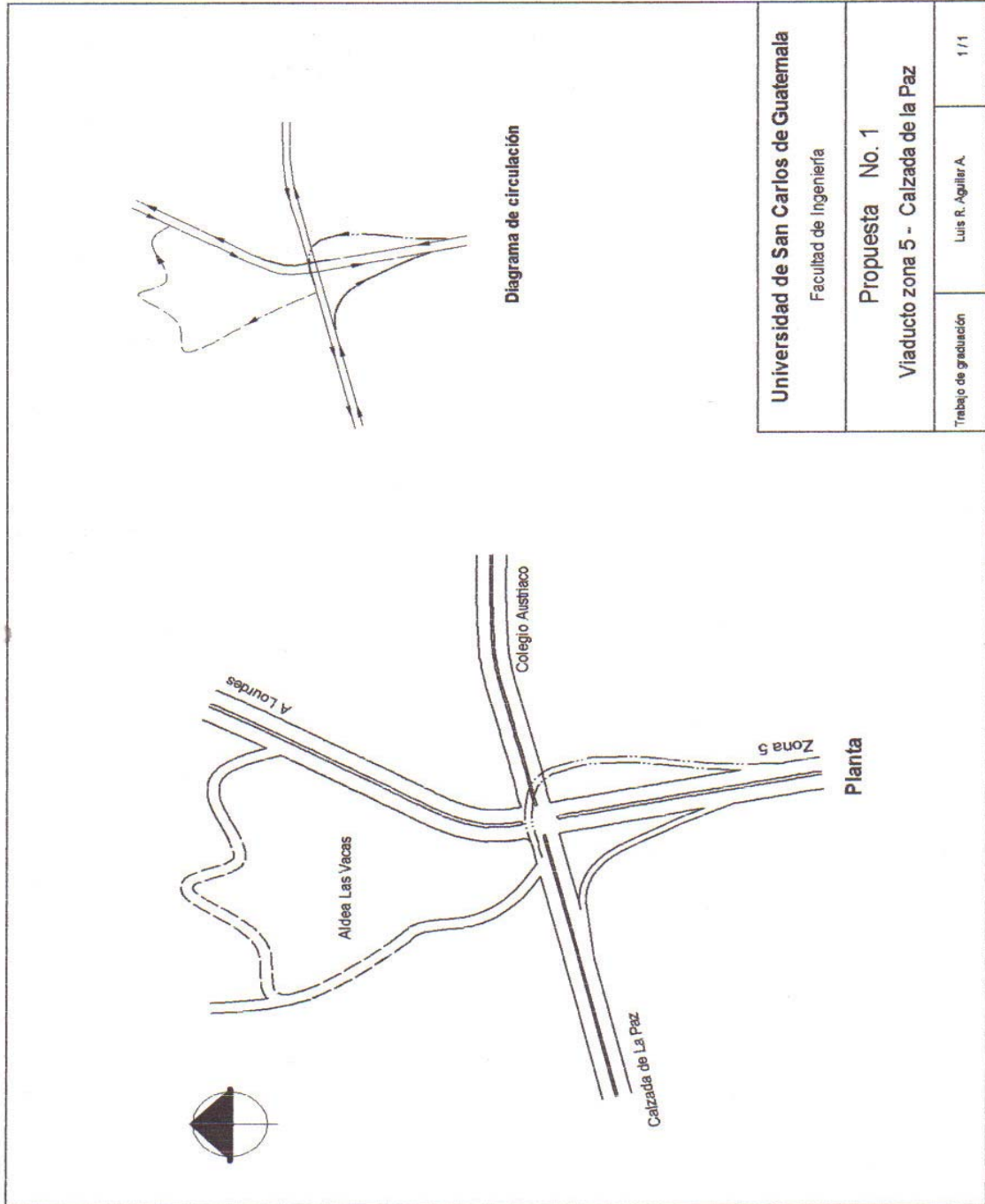
N = número de carriles

V = volumen horario del movimiento (vehículos por hora)

Según este razonamiento, entonces los movimientos de la zona 5 a la calzada La Paz deben tener como mínimo 2 carriles.

La propuesta puede verse en la Figura 36, que se muestra a continuación.

Figura 37 Propuesta N° 1 Viaducto Zona 5 – Calzada de la Paz



Universidad de San Carlos de Guatemala Facultad de Ingeniería	
Propuesta No. 1 Viaducto zona 5 - Calzada de la Paz	
Trabajo de graduación	Luis R. Aguilar A.
1 / 1	

5.2.2 . Trébol parcial de dos hojas

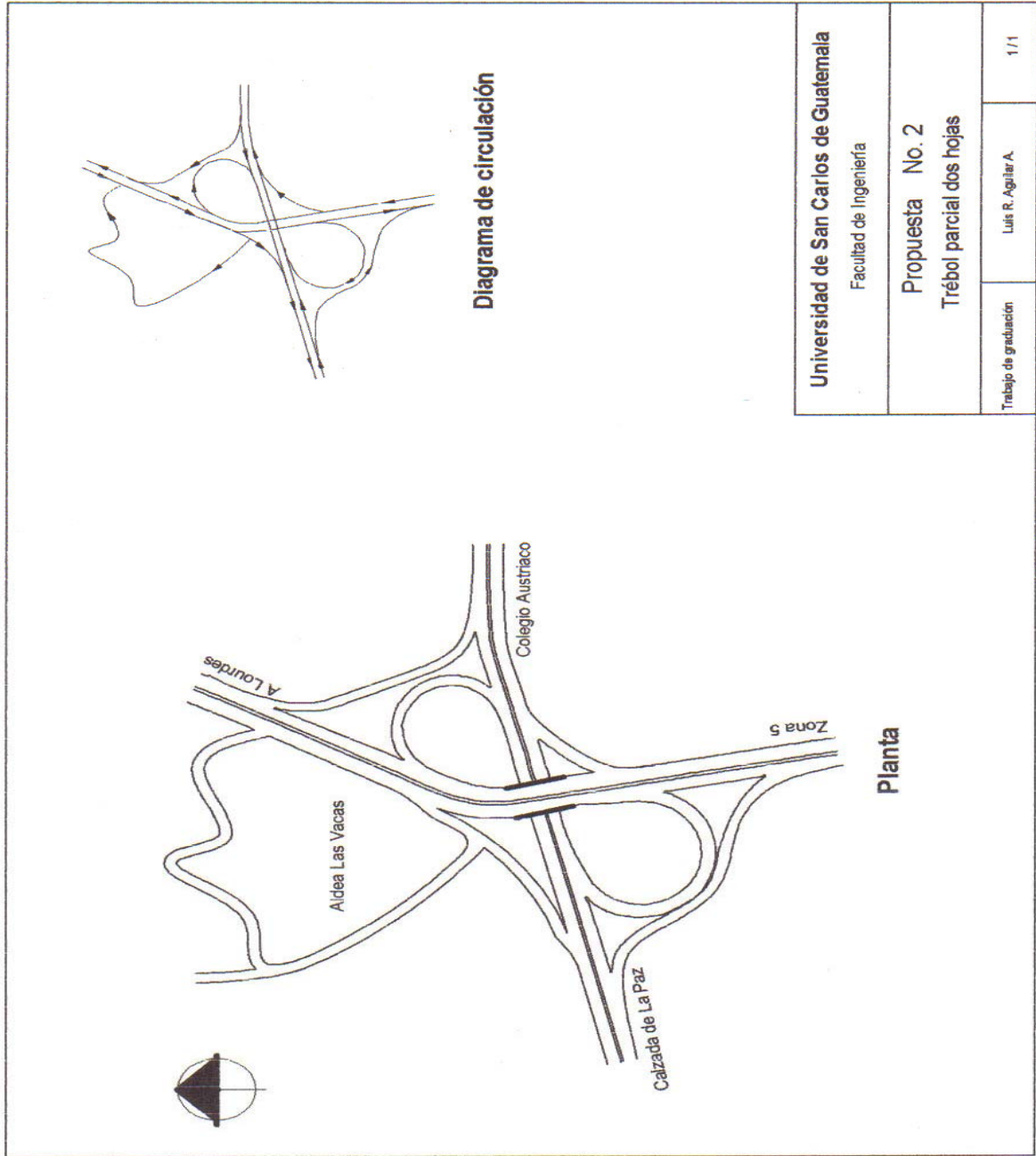
En la figura 37 se puede observar la propuesta de trébol parcial de dos hojas, por medio de la cual se pueden cubrir los cinco movimientos de mayor flujo.

Una de las hojas del trébol parcial cubre los movimientos zona 5 – Calzada de La Paz, que tiene la prioridad en la hora pico vespertina, mientras que la otra hoja cubre el movimiento Lourdes – Austriaco.

A su vez; se plantean los cruces a la derecha por medio de rampas colectoras- distribuidoras de los movimientos Austriaco - Lourdes y Calzada de La Paz- zona 5 y zona 5 - Austriaco. Éste último ya existe en la actualidad, sin embargo; se considera conveniente ampliarlo por lo menos, a dos carriles dejando en su salida un área de aceleración adecuada.

El movimiento Austriaco - zona 5 puede manejarse al desviar el tránsito hacia las calles de la aldea Las Vacas y el cruce a la izquierda restante que es Calzada de La Paz a Lourdes debe hacerse mediante una vuelta en “U” en Calzada de la Paz - Austriaco. Para dicha vuelta en “U”; lo más seguro para los conductores es que el flujo de tránsito llegue hasta la rotonda enfrente del Colegio Austriaco; debido a las fuertes pendientes existentes del acceso este.

Figura 38 Propuesta N° 2 Trébol parcial de dos hojas



5.2.3 . Trébol completo

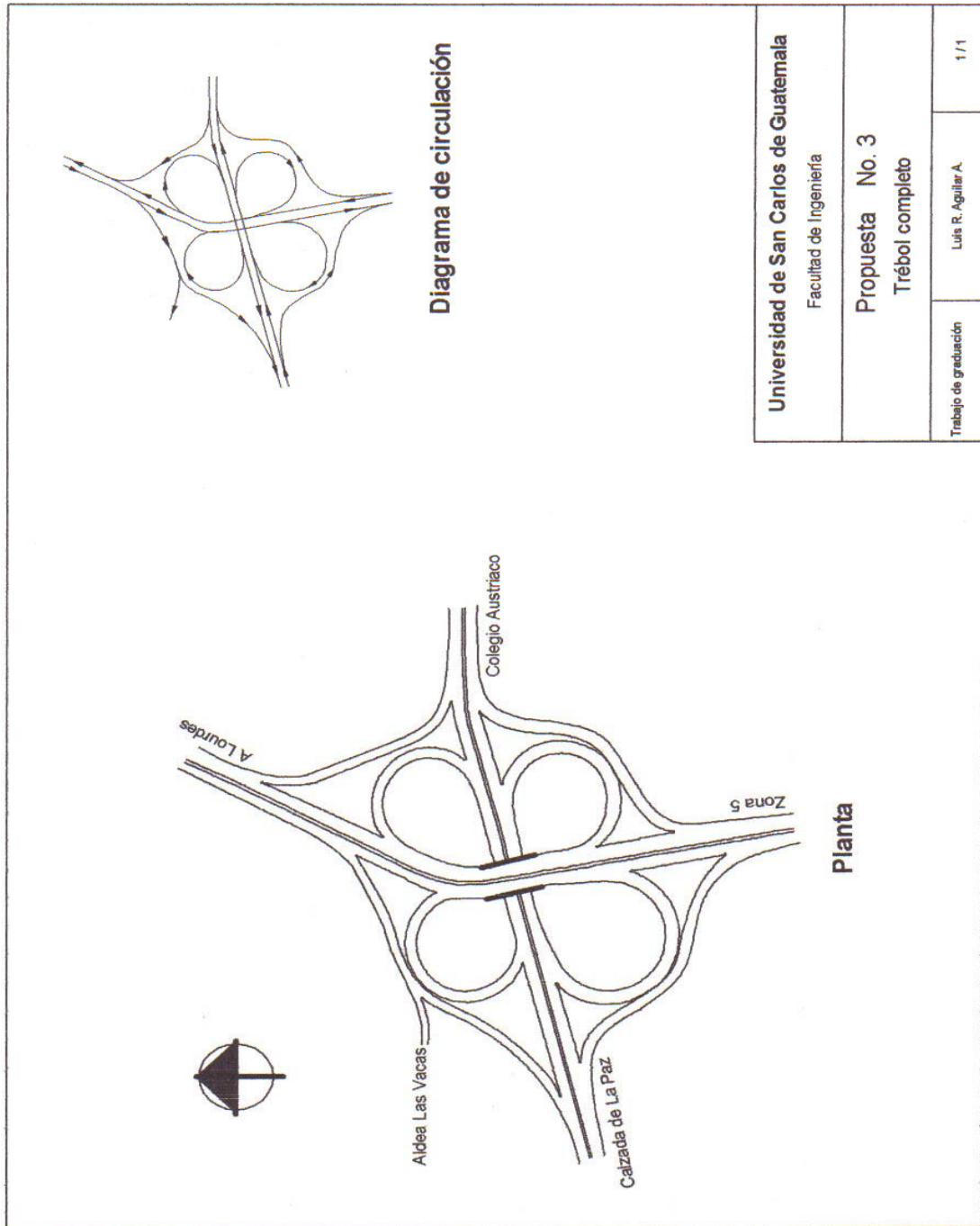
En esta última propuesta se hace la separación de todos los movimientos, ya que los cruces a la izquierda se realizan mediante las hojas del trébol y los giros a la derecha por medio de rampas colectoras - distribuidoras.

Al igual que la solución de trébol parcial se concede el privilegio de paso a los movimientos zona 5 - Lourdes y Lourdes - zona 5 que pasan en la parte superior del puente. Los movimientos con orientación oriente – poniente o viceversa, pasan por debajo del puente.

La entrada a la aldea Las Vacas se complica por la geometría del Trébol ya que para poder ingresar a esta población desde cualquiera de los movimientos hay que dar un gran rodeo porque se necesita llegar a Lourdes o a la aldea Santa Rosita para poder retornar por el acceso norte y bajar por la rampa Lourdes – Calzada de la Paz donde se bifurca el acceso a Las Vacas.

Por otro lado, se deben considerar fuertes estructuras de drenaje en la parte occidental de la intersección por la presencia del riachuelo de Santa Rosita y el Río Negro. Los cauces de los ríos, a su vez, influyen en la calidad de los suelos de cimentación porque las áreas adyacentes a las riberas probablemente tienen niveles freáticos superficiales que crean zonas inestables por la presencia de suelos saturados.

Figura 39 Propuesta N° 3 Trébol completo



5.3. Criterios para selección final

De acuerdo con las propuestas planteadas en la sección anterior, se puede hacer una comparación de las ventajas y desventajas de cada una de ellas y determinar los alcances de su aplicación.

La primera solución propuesta, que es construir el viaducto zona 5 a Calzada de La Paz, es aplicable en el caso que no se consiga el derecho de vía para desarrollar rampas u hojas de trébol en ninguno de los cuadrantes de la intersección. Sin embargo, esta solución tiene el gran inconveniente que la capacidad de la intersección depende de la asignación de tiempos del semáforo.

Como se mencionó en su oportunidad, el trébol parcial de dos hojas puede manejar los cinco movimientos de mayor volumen, pero las hojas de trébol faltantes deben sustituirse por virajes en "U". Este tipo de maniobra es peligrosa para los conductores que deben buscar brechas de paso en la corriente de tránsito que se mueve en sentido contrario. Otro inconveniente de las vueltas en "U" es que si uno de los movimientos involucrados en esta maniobra llega a crecer mucho en un futuro se puede llegar a una gran pérdida de la capacidad y aumento de la demora para estos movimientos.

Finalmente, el trébol completo soluciona todos los movimientos, pero ocupa mayor área del derecho de vía, situación que encarece la aplicación de esta solución.

Por otro lado, para poder desarrollar la hoja de trébol del movimiento Calzada de La Paz a la colonia Lourdes, se debe hacer un corte muy grande en el talud existente del cuadrante sureste de la intersección.

Sin embargo, por lo que se puede observar en la zona de la intersección, es que la calidad de los suelos provenientes del corte antes mencionado podrían ser de muy buena calidad para servir de banco de materiales para los rellenos que se deben efectuar para desarrollar las rampas y hojas de trébol en los otros tres cuadrantes de la intersección.

Por último, se puede concluir que esta propuesta es la más cara respecto a las anteriores, pero se debe tener presente que también es la que ofrece mayor capacidad y nivel de servicio.

Con mayor capacidad y la consiguiente disminución de las demoras; se tiene una mayor velocidad de los vehículos y también se reducen costos de operación vehicular. A su vez, se frena la contaminación ambiental ya con menor demora la tendencia es que baje la emisión de poluciones provenientes de los vehículos automotores.

Por esta razón el autor del presente trabajo de graduación, considera que debe elegirse esta propuesta de solución.

CONCLUSIONES

1. En Guatemala es evidente que la falta de estudios de tránsito ha sido una limitante para poder elaborar proyectos de tránsito.
2. De acuerdo con el **Manual de capacidad de carreteras**, en una intersección con semáforo, los tiempos de luz verde deben ser como máximo de 120 segundos para no ocasionar congestionamiento en los demás accesos de la intersección.
3. La demora en la intersección del bulevar a la colonia Lourdes y la Calzada de La Paz alcanza valores intolerables, según la metodología del **Manual de capacidad de carreteras**.
4. Si se mejora la geometría en la intersección del bulevar a la colonia Lourdes y La Calzada de La Paz, se logra una reducción del tiempo de viaje, se disminuye la contaminación ambiental, los costos de operación vehicular, así como el riesgo de accidentes.

RECOMENDACIONES

1. Las autoridades encargadas del diseño y regulación del tránsito en Guatemala deben hacer un esfuerzo por adquirir la tecnología de punta que ya se aplica en otros países, específicamente en los programas de computación que realizan la simulación de modelos de circulación vehicular.
2. Realizar un diseño geométrico de la intersección del bulevar a la colonia Lourdes y la Calzada de La Paz, el diseño ha de tomar conteos de tránsito actualizados, así como realizar un estudio económico de la inversión para poder ejecutar el proyecto de paso a desnivel.
3. Efectuar estudios de campo de demora y flujos de saturación en varias intersecciones conflictivas en la ciudad de Guatemala, para lograr una mejor comprensión de los problemas de tránsito en las mismas, según la metodología resumida en el presente trabajo de graduación.
4. La Municipalidad de Guatemala, dentro de sus posibilidades, debe publicar los resultados de los conteos mecánicos que se realizan en varios puntos de la ciudad, para crear una base de datos que los profesionales en materia de ingeniería de tránsito y / o diseño de vías terrestres puedan emplear para ejecutar proyecciones del crecimiento del tránsito a corto, mediano y largo plazo.

5. En los estudios de tránsito se recomienda apoyar los conteos mecánicos con conteos clasificados por tipo de vehículo.

6. Con el fin de llevar a la realidad las recomendaciones del plan maestro de transporte, planteado por la Agencia de Cooperación Internacional Japonesa (JICA), se estructurarán los estudios correspondientes.

BIBLIOGRAFÍA

1. American Association of State Highway Officials. **A Policy on design of urban highways and arterial streets.** AASHO, Washington, D. C., 1973.
2. Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA). **Estudio Plan maestro para el sistema del transporte Urbano en Guatemala en el área Metropolitana de Guatemala, informe final.** S. E. Ciudad de Guatemala, 1992.
3. Akçelik, Rahmi. **HCM 2000 Back of Queue Model for Signalized Intersections.** Akçelik, & Associates Pty Ltd Technical Note, Australia, September 2001. www.aattraffic.com
4. Akçelik, Rahmi. **Progression Factors in the HCM 2000 Queue and Delay Models for Traffic Signals.** Akçelik, & Associates Pty Ltd Technical Note, Australia, September 2001. www.aattraffic.com
5. Akçelik, Rahmi and Mark Besley. **Acceleration and deceleration models.** 23rd Conference of Australian Institutes of Transport Research Proceedings, Monash University, Melbourne, Australia, 2001 www.aattraffic.com
6. Akçelik, Rahmi and Mark Besley. **Microsimulation and analytical methods for modelling urban traffic.** Paper presented at the Conference on Advance Modeling Techniques and Quality of Service in Highway Capacity Analysis, Truckee, California, USA, July 2001 pp. 19 www.aattraffic.com
7. Akçelik, Rahmi and Mark Besley. **Operating cost, fuel consumption, and emission models in aaSIDRA and aaMOTION.** 25th Conference of Australian Institutes of Transportation Research (CAITR 2003), University of South Australia, Adelaide, Australia, 2003. www.aattraffic.com
8. Álvarez Vargas, Mario Antonio. Propuesta de paso a desnivel en la diagonal 17 y anillo periférico zona 11. Tesis Ing. civil. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1993.
9. Arribas Menes, Fernando. La ingeniería de tránsito y su aplicación a un corredor urbano (proyecto de elevación de la capacidad y seguridad vial de la avenida Bolívar). Tesis Ing. civil. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería. 1993.

10. Cal y Mayor, *et al.* **Ingeniería de tránsito: Fundamentos y aplicaciones.** 7ª. ed. Editorial Alfa y Omega, México, 1994.
11. Dickey, John W. **Metropolitan transportation planning.** Mc Graw – Hill Company: New York, 1975.
12. Florida Department of Transportation. **Florida Intersection Design Guide For New Construction and Mayor Recostruction of At-Grade Intersections on the State Highway System.** FDOT, Florida, USA, 2002.
13. Florida Department of Transportation. **Project Traffic Forecasting Handbook.** FDOT, Florida, USA, 2002.
14. Garber, Nicholas J. and Fontaine Michael. **Guidelines for Preliminary Selection of the Optimum Interchange Type for a Specific Location.** Virginia Department of transportation Charlottesville, Virginia, USA, 1999.
15. González Corado, Byron Giovanni. Propuesta de paso a desnivel de la Parroquia Zona 6. Tesis Ing. civil. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1995.
16. Hernández, Montenegro, Mario. Propuesta Metodológica para el Diseño de Distribuidores de Transito. Tesis Ing. civil. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1988.
17. Hugh Jones, John. **Proyecto geométrico de carreteras modernas** Compañía Editorial Continental, S.A, México, 1961.
18. Plan maestro de Transporte. Boletines de tránsito años 1976 – 1987, conteos de tránsito años 1990 y 1995 Municipalidad de Guatemala.
19. Transportation Research Board. **Highway Capacity Manual.** Special Report 209 National Research Council. Washington, D.C. 2000
20. Valdés González, Roldan Antonio. **Ingeniería de tráfico.** Editorial Dossat, México, 1996.

APÉNDICE

FORMULARIOS PARA ANÁLISIS DE CAPACIDAD Y NIVEL DE SERVICIO EN INTERSECCIONES CON SEMÁFORO

Figura 40 Hoja Ingresos de datos

HOJA INGRESO DE DATOS					
INTERSECCION:		PERIODO DE ANALISIS:			
ANALISTA:					
TIPO DE ÁREA:					
UBICACIÓN _____		FECHA _____			
GEOMETRÍA Y VOLÚMENES					
<u>Volúmenes de tránsito</u>					
CONDICIONES DE CALZADA Y TRÁNSITO					
Acceso	Pendiente %	%VP	Parqueo carril adyacente	Buses	FHP
VP: vehículos con más de 4 ruedas			FHP: Factor hora pico		
Nm: número de maniobras estacionamiento			NB: buses parando en intersecc. / hora		
PC: No. de peatones conflictivos			Tipo de llegada: 1-5		
FASES (Dibujar diagramas)					
Cruce protegido Peatones	 		 		
			Cruce permitido Ciclo: 123 s		

Figura 41 Hoja de extensión de colas (Parte 1/2)

HOJA DE CALCULO EXTENSION DE COLAS (Parte 1/2)												
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Acceso	N		S		E			W				
Grupo de carriles		IFD		I	FD			IFD			IF	
Cola inicial por carril al principio del período de análisis, Q_{bL}												
Flujo por carril v_L												
Flujo de saturación por carril s_L												
Capacidad por carril c_L												
Relación de flujo v_L/s_L												
$X_L=v_L/c_L$												
Verde efectivo g												
Relación de verde $U=g/C$												
Factor de filtración												
Prop. de veh. en verde, P												
Relación de grupo de vehículos, R_p												
Factor de ajuste de efectos de avance PF2												
Primer término ecuación Longitud de cola Q1												
Factor de incremento del segundo término k_B												
$z=X_L-1+Q_{bL}/(C_L T)$												
Segundo término ecuación longitud de cola Q2												
$Q=Q1+Q2$												
Proyecto:								Fecha:				
Analista:								Hoja No.:	/			

Figura 42 Hoja de cálculo de extensión de colas (Parte 2/2)

HOJA DE CÁLCULO EXTENSIÓN DE COLAS (Parte 2/2)												
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Acceso												
Grupo de carriles												
Q=Q1+Q2												
Percentil de extensión de colas			70%	85%	90%	95%	98%					
p1												
p2												
p3												
Factor percentil de extensión de colas $f_{B\%}$												
Percentil de extensión de colas $Q_{\%}=f_{B\%} * Q$												
Tasa de almacenamiento de colas												
Espaciamiento promedio en la cola L_h (m)												
Almacenamiento de cola disponible L_a (m)												
Tasa promedio de almacenamiento de colas RQ												
Tasa percentil de almacenamiento de colas RQ%												
Proyecto:	-	-	-	-	-	-	-	Fecha:	-	-	-	-
Analista:	-	-	-	-	-	-	-	Hoja No.:	-	-	-	/

Figura 43 Hoja de cálculo de ajuste de volúmenes y tasa de flujo de saturación

HOJA DE CÁLCULO AJUSTE DE VOLÚMENES Y TASA DE FLUJO DE SATURACIÓN												
Información general												
Descripción del proyecto:												
Ajuste de volúmenes												
	Norte			Sur			Este			Oeste		
	I	F	D	I	F	D	I	F	D	I	F	D
Volumen, V (veh/h)												*
Factor de hora pico FHP												
Tasa de flujo ajustada, $v_p=V/FHP$												
Grupo de carriles												
Tasa de flujo grupo carriles, v (Veh/h)												
Proporción de vuelta (Pvi) o (Pvd)												
Tasa de flujo de saturación												
Flujo de saturación base so (vl/h/carril)												
Número de carriles, N												
Factor de ajuste ancho de carril fa												
Factor de ajuste vehículo pesado, fVP												
Factor de ajuste pendiente, fg												
Factor de ajuste parqueo, fp												
Factor de ajuste por bloqueo buses, fbb												
Factor de ajuste tipo de área, fA												
Factor de ajuste utilización de carril, fuc												
Factor de ajuste por cruce izquierda., fvi												
Factor de ajuste por cruce derecha., fvd												
Factor peat. /bici. izquierda fpb i												
Factor peat. /bici. derecha, fpb d												
Tasa de flujo de sat. ajustada, s (veh/h)												
$s=so N fa fvp fg fp fbb fA fvi fvd fpb i fpb d$												
Notas:												

Figura 44 Hoja de cálculo capacidad y nivel de servicio

HOJA DE CÁLCULO CAPACIDAD Y NIVEL DE SERVICIO												
Análisis de capacidad												
Descripción del proyecto: Análisis operacional Intersección Lourdes - La Paz Hora pico 19:00 - 20:00												
Acceso	Norte			Sur			Este			Oeste		
Grupo de carriles												
Tasa de flujo ajustada v (veh/h)												
Tasa de flujo saturación s (veh/h)												
Tiempo perdido $t_l = I_1 + Y - e$												
Verde efectivo $g = G + Y - t_l$												
Duración ciclo C												
Relación de verde g/C												
Capacidad grupo carriles $c = s(g/C)$ (veh/h)												
$X = v/c$												
Tasa de flujo v/s												
Grupo de carriles críticos <input checked="" type="checkbox"/>												
Suma de tasas de flujo de carriles críticos, $Y_c = \sum (v/s)_c$	0.000						Tiempo perdido total por ciclo, L (s)			24		
Relación de tasas de flujo críticas a capacidad, $X_c = Y_c * (C) / (C - L)$	0											
Nivel de servicio												
Demora uniforme d_1 (ver Fig 17.x)												
Factor ajuste progresión FP												
Factor calibración incremento demora k												
Incremento demora d_2												
Demora cola inicial d_3 (Ver Fig. 17.x)												
Demora $d = d_1 * FP + d_2 + d_3$												
Nivel de servicio grupo de carriles												
Demora acceso d_A												
Nivel de servicio acceso												
Tasa de flujo acceso v_A (veh/h)												
Demora intersección d_i							NDS Intersección					

Figura 45 Hoja de cálculo cola inicial

HOJA DE CÁLCULO COLA INICIAL												
Información general												
Descripción del proyecto:												
Período (i)	1			Duración período de análisis, T			_____			Longitud de ciclo, C		
Acceso												
Grupo de carriles												
Cola inicial Q _b (veh)												
Relación de verde g/C												
X = v/c												
Capacidad grupo carriles c=s(g/C) (veh/h)												
Duración demanda no satisfecha en T (h)												
$t = \min \left\{ T, \frac{Q_b}{c[1 - \min(1, X)]} \right\}$												
Caso												
Casos I y II (Q_b=0)												
Demora uniforme d ₁ es como se muestra en figura 17.x, demora por cola inicial d ₃ = 0												
Caso III (Q_b>0) (X ≤ 1.0) (t < T)												
$d_1 = 0.50C(1 - g/C) \frac{t}{T} + \frac{0.50C(1 - g/C)^2}{(1 - (g/C) \min(1, X))} \left[\frac{T-t}{T} \right] * PF$												
$d_3 = \frac{1800 Q_b t}{cT}$												
Caso IV (Q_b>0) (X ≤ 1.0) (t = T)												
$d_1 = 0.50C(1 - g/C)$												
$u = 1 - \frac{cT}{Q_b} [1 - \min(1, X)]$												
$d_3 = 1800 Q_b / c(1 + u)$												
Caso V (Q_b>0) (X > 1.0) (t = T)												
$d_1 = 0.50C(1 - g/C)$												
$d_3 = 3600 Q_b / c$												

