



**SUBSECRETARIA DE DESARROLLO
URBANO Y ORDENACION DEL TERRITORIO**

DIRECCIÓN GENERAL DE ORDENACION DEL TERRITORIO

**PROGRAMA DE ASISTENCIA TECNICA
EN TRANSPORTE URBANO PARA LAS
CIUDADES MEDIAS MEXICANAS**

MANUAL NORMATIVO

TOMO XII

Manual de Estudios de Ingeniería de Tránsito

PREFACIO

Este documento forma parte de un conjunto de manuales desarrollados con el fin de orientar y auxiliar a las instituciones responsables a nivel central, estatal y municipal en las tareas inherentes a los procesos de solución de los problemas de transporte en las ciudades medias mexicanas.

Partiendo del concepto de que es necesario investigar y analizar los problemas de transporte urbano de manera integral, se ha desarrollado una metodología de trabajo que considera cinco áreas de acción: **desarrollo institucional, vialidad y tránsito, mantenimiento vial, transporte público e impacto ambiental**. El estudio de estas áreas abarca diferentes aspectos, mismos que son contemplados en los manuales desarrollados, los que se recomienda utilizar como guía primero y como herramienta después, en los procesos de análisis de los problemas del transporte urbano.

Es importante señalar que estos manuales, a pesar de ser independientes entre sí, mantienen una estructura coherente como conjunto, dado que son piezas a ser utilizadas integralmente para el logro de la meta central: el mejoramiento de la calidad de vida de las ciudades a través de uno de sus elementos esenciales, el transporte.

El conjunto de manuales está formado por los siguientes tomos:

- I Resumen Ejecutivo de los Manuales Normativos en Transporte Urbano**
- II Conceptos y Lineamientos para la Planeación del Transporte Urbano**
- III Desarrollo Institucional**
- IV Diseño Geométrico de Vialidades**
- V Operación del Transporte Público**
- VI Elaboración del Inventario del Estado Funcional de Pavimentos**
- VII Evaluación Socioeconómica**
- VIII Impacto Ambiental en Estudios de Transporte Urbano**
- IX Guía Metodológica de Muestreo, Monitoreo y Análisis de Contaminación del Aire por Fuentes Móviles y por Ruido en Estudios de Transporte Urbano**
- X Identificación y Evaluación del Impacto al Entorno, derivado de Obras de Infraestructura de Vialidad y Transporte Urbano**
- XI Conceptualización de Proyectos Ejecutivos**
- XII Estudios de Ingeniería de Tránsito**
- XIII Manual Técnico de Normas, Seguimiento y Control de Obras de Vialidad y Transporte Urbano:**
 - Libro 1.- Ejecución y Control de Calidad de Obras Viales**
 - Libro 2.- Conservación de Obras Viales**
 - Libro 3.- Seguimiento y Control de Obras Viales**
- XIV Manual de Administración de Pavimentos en Vialidades Urbanas**

Para saber el contenido de un manual específico, así como para entender cómo se integran los diversos elementos del proceso que conduce, desde la observación de un problema de transporte urbano hasta la formulación de planes y programas de acción para resolverlo, se recomienda leer el **Tomo I: Resumen Ejecutivo de los Manuales Normativos en Transporte Urbano**.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I. CLASIFICACIÓN DE LA RED VIAL	1
1. Funciones de la Vialidad	1
2. Jerarquía de Movimientos	1
3. Sistema Funcional	2
4. Clasificación Funcional de Sistemas Viales en Áreas Urbanas	3
CAPÍTULO II. ESTUDIOS DE VOLÚMENES	5
1. Definiciones	5
2. Usos de los Datos de Volúmenes de Tránsito	5
3. Métodos de Muestreo	6
CAPÍTULO III. DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES INSTANTÁNEAS EN LA VÍA	13
1. Aplicación de Estudios de Velocidades Instantáneas	13
2. Ubicación de los Estudios	14
3. Requerimientos del Tamaño de la Muestra	14
4. Procedimiento	16
CAPÍTULO IV. TIEMPOS DE VIAJE Y DEMORAS	17
1. Aplicaciones	17
2. Requerimientos del Tamaño de la Muestra	18
3. Método del Vehículo de Prueba	19
4. Análisis de Datos y Sumario de Estadísticas	21
5. Estudios de Demoras en Intersecciones	21
CAPÍTULO V. ESTUDIO DE ESTACIONAMIENTOS	25
1. Inventarios de Estacionamientos	25
2. Efecto de Estacionamiento sobre la Vía en la Capacidad	37
CAPÍTULO VI. ESTUDIOS DE ACCIDENTES DE TRÁNSITO	39
1. Sistema de Récord Permanente	39
2. Análisis Detallado de Accidentes	42
3. Cálculo de los Índices de Accidentes	45
CAPÍTULO VII. ANÁLISIS ESTADÍSTICOS	47
1. Procesamiento de los Datos	47
2. Estadísticas Descriptivas	49
3. Distribuciones de Poisson	54
4. Distribución Exponencial Negativa	57
CAPÍTULO VIII. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL TRÁNSITO	59
1. Capacidad y Niveles de Servicio	59
2. Vías de Flujo Continuo	62
3. Condiciones de Congestión	65
4. Introducción a Vías Rápidas	70

CONTENIDO

CAPÍTULO IX. CAPACIDAD DE INTERSECCIONES SEMAFORIZADAS	75
1. Introducción	75
2. Módulo de Entrada	76
3. Módulo de Ajustes de Volúmenes	78
4. Módulo de Flujos de Saturación	82
5. Comportamiento del Flujo Discontinuo	95
6. Módulo de Capacidad	99
7. Módulo de Nivel de Servicio	101
CAPÍTULO X. DISEÑO Y OPERACIÓN DE SISTEMAS DE TRÁNSITO	133
1. Diseño de Intersecciones Aisladas y SemafORIZADAS de Tiempo Fijo	133
2. Sugerencias para Estimar Elementos de Diseño de Geometría de Intersecciones	135
3. Diseño de Semáforos	138
4. Semáforos Actuados con Respecto a los de Tiempo Fijo	145
5. Semáforos Actuados	147
6. Fases de Semáforos	153
7. Consideraciones para el Diseño de Fases	164
8. Tiempos de Semáforos	166
9. Sistemas de Semáforos	181
10. Tiempos de Semáforos para Redes Cerradas	192
11. Detectores	198
CAPÍTULO XI. METODOLOGÍA DE ESTUDIOS DE IMPACTO VIAL	209
1. Requisitos para los Estudios	209
2. Extensión del Estudio	209
3. Área de Estudio	210
4. Selección de los Horizontes de Análisis	211
5. Datos Base para el Estudio de Impacto Vial	213
6. Proyecciones de Tránsito No Relacionadas con el Desarrollo	216
7. Generación de Viajes del Desarrollo Propuesto	218
8. Distribución y Asignación de Viajes	221
9. Análisis Operacional	225
10. Determinación de Medidas Mitigantes del Impacto Vial	225
11. Preparación del Informe	226
BIBLIOGRAFÍA	229

INTRODUCCIÓN

En la elaboración de los Estudios Integrales de Transporte y Vialidad del Proyecto de las Cien Ciudades emprendido por la SEDESOL, se ha constatado la necesidad de manuales que sirvan de referencia rápida y que describan procedimientos comúnmente usados en la Ingeniería de Tránsito. El presente documento es la actualización del manual publicado en noviembre de 1994. Cabe aclarar que este trabajo debe pasar por un periodo de prueba y se encuentra sujeto a cambios para satisfacer a las necesidades de los usuarios. Es importante resaltar que, como todo manual que intenta adaptarse a las necesidades de los usuarios, las sugerencias que se le hagan son bienvenidas.

En la elaboración del manual se ha considerado desde la recopilación de información, hasta el análisis y diseño de sistemas de tránsito, así como también la optimización de tiempos de semáforo. Sin embargo, el manual solo puede servir de guía general para el profesional que requiere información acerca del diseño de proyectos ejecutivos de sistemas de tránsito.

Con la finalidad de difundir la metodología involucrada, la SEDESOL presenta este manual actualizado, a un nivel en el cual sirva de apoyo no sólo para la elaboración de los estudios integrales de transporte, sino también para la operación y diseño de sistemas de tránsito urbano.

El manual ha sido dividido en once capítulos, en donde los seis primeros se dedican a la discusión de procedimientos para el procesamiento de datos de estudios de tránsito, de los cuales el primero se refiere a la clasificación de la red vial, mientras que el segundo trata de los datos de volumen de tránsito que son necesarios para planificar, evaluar y diseñar sistemas de tránsito.

El tercer capítulo trata sobre velocidades instantáneas sobre la vía, mismo que se incluye debido a la importancia de este tipo de estudios en el diseño de dispositivos de control de tránsito, determinación de los límites de velocidad, diseño geométrico de vialidad y seguridad vial. El cuarto capítulo trata de tiempos de viaje y demoras, elementos fundamentales para la evaluación de la operación del tránsito sobre vialidad. El quinto capítulo aborda los estudios de estacionamiento: discute las metodologías comúnmente usadas para determinar la oferta de estacionamientos, permanencia y rotación; también se incluye metodología para determinar la demanda de estacionamiento de diversos usos del suelo, la demanda estimada de casos centrales de ciudades y los impactos en la capacidad vial de estacionamiento sobre la vía. El capítulo sexto se encuentra dedicado a los procedimientos necesarios para mantener un archivo de accidentes que sea de utilidad al ingeniero de tránsito; donde se resumen los procedimientos usados en el análisis de accidentes: recopilación de datos, determinación de índices de acciones de accidentes y estudios antes y después de las mejoras.

En cuanto al capítulo séptimo, en éste se ilustran algunos de los procedimientos estadísticos utilizados en la ingeniería de tránsito. Es importante resaltar la importancia de la estadística en la ingeniería de tránsito debido al carácter aleatorio de todos los eventos de tránsito. En el capítulo octavo se tratan los conceptos básicos de capacidad vial y niveles de servicio, así como las características del flujo continuo y discontinuo en vías urbanas.

El capítulo noveno trata del cálculo y análisis de capacidad de intersecciones semaforizadas en el cuál se definen los conceptos fundamentales de la capacidad de intersecciones semaforizadas, el diseño y dimensionamiento de la vialidad controlada por semáforos. El

capítulo décimo aborda el diseño y operación de sistemas de tránsito en el cual se discuten los requisitos para la instalación de semáforos, así como el funcionamiento de semáforos actuados y sistemas de semáforos coordinados.

Finalmente, el décimo primer capítulo trata sobre los impactos a la vialidad derivados de la construcción de nuevos desarrollos urbanos, en el que se describe la metodología comúnmente usada para estos estudios.

Se ha considerado que estos procedimientos resultan de gran importancia para los Ayuntamientos que deseen que su sistema de transporte satisfaga las necesidades creadas por el crecimiento de las ciudades.

Se espera que el trabajo aquí presentado sea de utilidad a los profesionales que se dediquen a la ingeniería de tránsito.

CAPITULO I. CLASIFICACIÓN DE LA RED VIAL

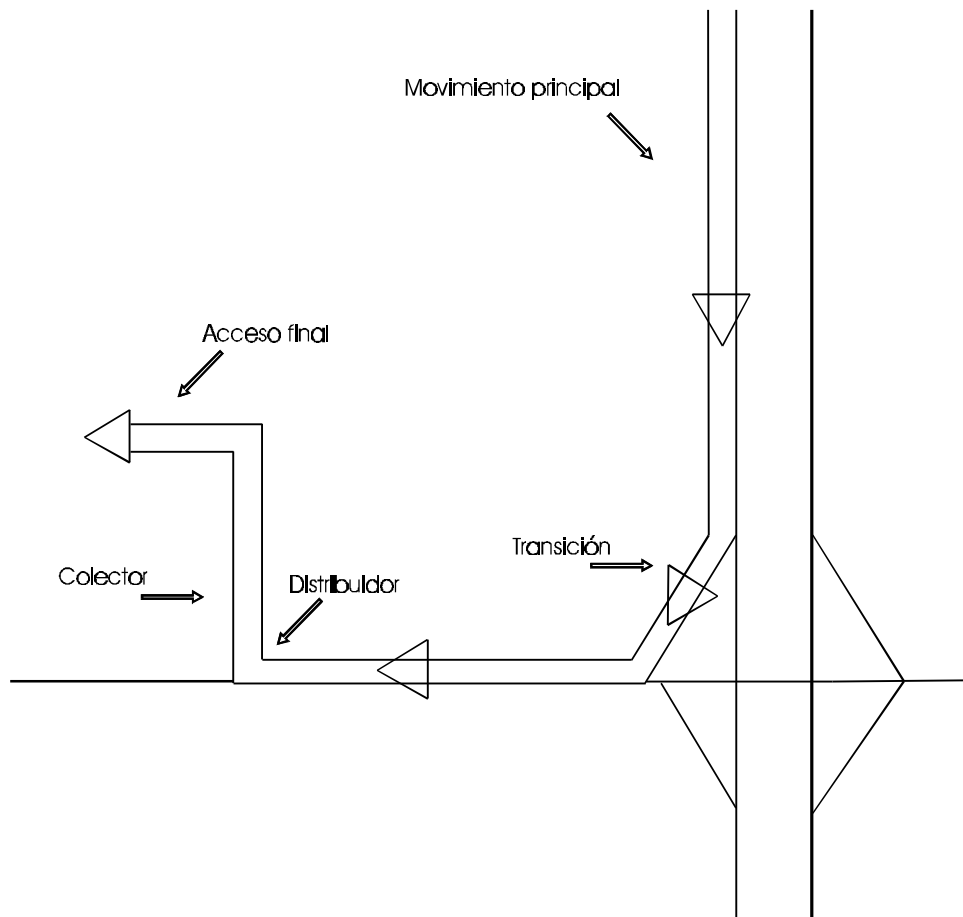
1. FUNCIONES DE LA VIALIDAD

En los párrafos a continuación se introducen los conceptos básicos requeridos para la comprensión de la clasificación funcional de los sistemas viales.

2. JERARQUÍA DE MOVIMIENTOS

Un sistema vial completamente funcional provee para una serie de movimientos de distintas características dentro de un viaje. Hay seis etapas dentro de la mayoría de los viajes: movimiento principal, transición, distribución, colección, acceso y final. Como ejemplo, la figura 1.1 (jerarquía de movimientos) muestra un viaje típico utilizando una vía expresa (autopista) de flujo ininterrumpido. Al aproximarse al destino, los vehículos utilizan una rampa de distribuidor (transición) que conecta la autopista con una arteria (distribuidor). Luego se ingresa a un colector, ya en la colonia de destino (colección), para luego ingresar a vialidades de carácter local hasta llegar al destino. Nótese que no todos los viajes tienen las seis etapas.

Figura 1.1. Jerarquía de Movimientos.



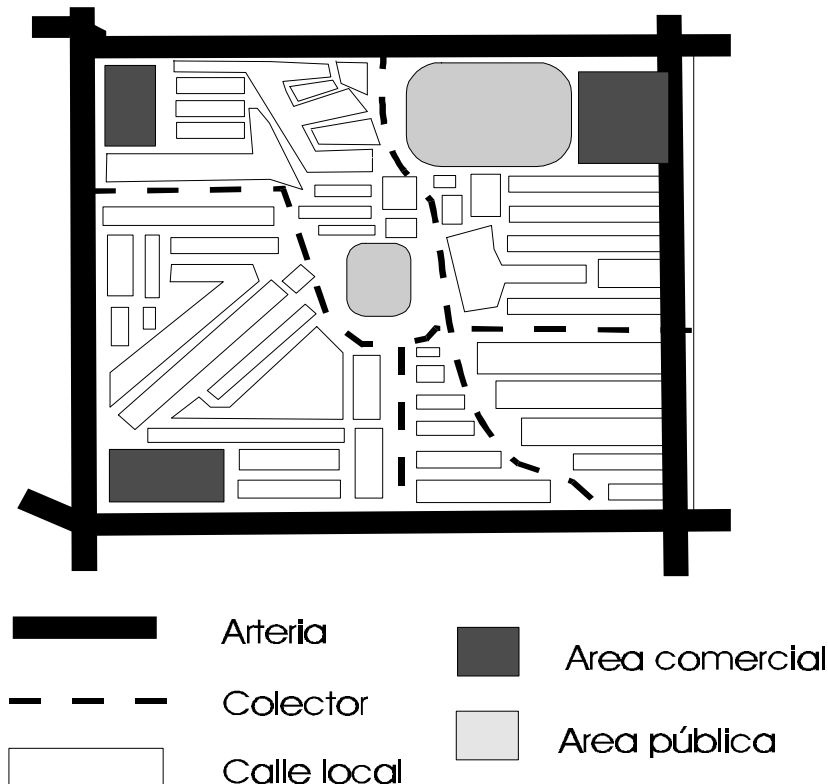
Cada una de las seis etapas de un viaje típico se efectúan en vialidades que cumplen una función específica. Cada una de estas vialidades debiera estar diseñada de acuerdo a su función, sin embargo en nuestros sistemas viales esto no es siempre cierto. Debido a que la jerarquía de movimientos se basa en la cantidad de tránsito total, los viajes en vías expresas son por lo general los más altos en la jerarquía de movimientos, seguidos por movimientos en arterias hasta llegar a movimientos locales.

3. SISTEMA FUNCIONAL

La clasificación funcional agrupa a calles y carreteras de acuerdo al carácter del servicio que deben proveer. Vialidades, de manera individual, no prestan servicio a los viajes independientemente. La mayoría de los viajes incluyen movimientos a través de redes viales y las vialidades utilizadas por estos movimientos pueden ser clasificadas de acuerdo a la red vial que conforman de una manera lógica. Por lo tanto, la clasificación funcional de las redes viales es consistente con la categorización de los viajes.

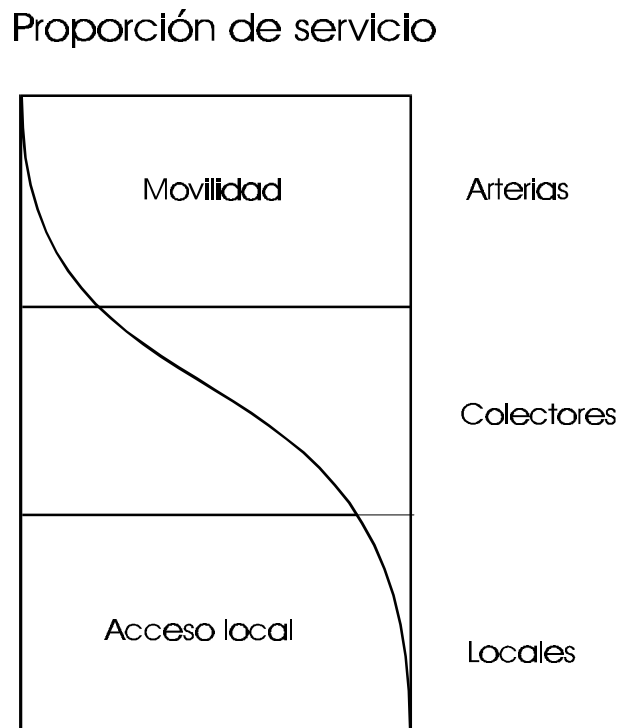
La jerarquía de movimientos en áreas urbanas se ilustra en la Figura 1.2. Sin embargo, la clasificación de vialidades es un poco complicada en áreas urbanas, ya que debido a la alta densidad y usos de suelo, los centros específicos de generación de viajes son muy difíciles de identificar; por lo tanto se deben tomar en cuenta consideraciones adicionales, tales como continuidad de las vialidades, distancia entre intersecciones, accesibilidad, de manera de poder definir una red lógica y eficiente.

Figura 1.2. Jerarquía de Movimientos en Red Vial Urbana.



Conjuntamente con la categorización del tránsito, está el rol que las redes viales juegan en (1) acceso y (2) movilidad de viajes. El acceso es un requerimiento fijo de una área definida. La movilidad se provee a diferentes niveles de servicio, siendo sus factores básicos la velocidad de operación y el tiempo de viaje. El concepto de categorización de tránsito conlleva no sólo a una clasificación de la jerarquía de las vialidades, sino también a una jerarquía similar en la distancia relativa de los viajes servidos por estas vialidades. Como ejemplo, en nuestras ciudades, una vialidad que atravesase una ciudad completa de norte a sur, es considerada una vialidad primaria, independientemente de sus características geométricas. De lo dicho anteriormente, las vialidades locales enfatizan el acceso, las arterias los movimientos principales y el alto nivel de movilidad y, los colectores ofrecen un servicio balanceado para ambas funciones. Este esquema se ilustra conceptualmente en la Figura 1.3. Es importante notar que el grado de control de acceso es un factor significativo en la definición de la clasificación funcional de las calles.

Figura 1.3. Proporción de Servicio de acuerdo a tipo de vía.



4. CLASIFICACIÓN FUNCIONAL DE SISTEMAS VIALES EN ÁREAS URBANAS

Los cuatro sistemas funcionales de vialidades para áreas urbanas son las arterias principales y las arterias menores (vialidad primaria), los colectores (vialidad secundaria) y las calles locales.

Sistema de Arterias Urbanas Principales

Este tipo de sistema sirve a los mayores centros de actividad en áreas urbanas, los corredores con los más altos volúmenes vehiculares, los deseos de viaje mas largos y lleva una

proporción alta de la totalidad de los viajes urbanos a pesar de que constituyen un pequeño porcentaje de la red vial total de la ciudad.

Este tipo de sistemas incluyen autopistas y arterias principales con control de acceso parcial o sin control de acceso.

Sistema de Arterias Urbanas Menores

Este sistema se interconecta y complementa al sistema anterior. Incluye a todas las arterias no clasificadas como principales. Este sistema pone mas énfasis en acceso y ofrece menos movilidad de tránsito que el sistema inmediatamente superior. Este sistema puede servir a rutas de autobuses locales y proveer continuidad entre comunidades, pero idealmente, no debería penetrar vecindarios.

Sistema de Colectores Urbanos

Este sistema provee acceso y circulación de tránsito dentro de vecindarios residenciales, áreas comerciales e industriales. Este sistema colecta tránsito de calles locales y los carriliza hacia el sistema de vialidades primarias.

Sistema de Calles Locales

Este sistema permite acceso directo a generadores de viajes, conectándolos con los sistemas de vialidades superiores. Ofrece el nivel mas bajo de movilidad y por lo general, no debiera llevar rutas de autobuses (por deficiencias en los sistemas viales de nuestras ciudades, esto muchas veces no se cumple).

En el cuadro que se muestra a continuación, se ilustra la distribución típica de los sistemas funcionales urbanos.

Sistemas	Rango	
	Volumen de Viajes (%)	Kilómetros (%)
Sistema Arterial Principal	40 - 65	5 - 10
Sistema Arterial Principal más Sistema Arterial Menor	65 - 80	15 - 25
Sistema Vial Colector	5 - 10	5 - 10
Sistema Vial Local	10 - 30	65 - 80

CAPITULO II. ESTUDIOS DE VOLÚMENES

1. DEFINICIONES

Volúmenes de Tránsito: Es el número de vehículos que pasa un punto determinado durante un periodo específico de tiempo.

Densidad de Tránsito: Es el número de vehículos que ocupan una unidad de longitud de carretera en un instante dado. Por lo general se expresa en vehículos por kilómetro.

Intensidad o Volumen Medio Diario (VMD): Es el volumen total que pasa por una sección transversal o por un segmento de una carretera, en ambos sentidos, durante un año, dividido entre el número de días en el año. Se puede obtener también para un solo sentido.

Trigésimo Volumen Horario Más Alto: El volumen horario que es excedido sólo por 29 volúmenes horarios durante un año dado.

Volumen Horario de Diseño (VHD): Es el volumen horario futuro utilizado para diseño. Por lo general se usa el trigésimo volumen horario más alto para el año futuro de diseño.

Relación entre el Volumen Horario de Diseño (VHD) y el Volumen Medio Diario (VMD): El volumen horario de diseño se expresa a menudo como un porcentaje del volumen medio diario. El rango normal está entre un 12% y un 18 % para ambos sentidos, y un 16% a un 24% para un solo sentido.

Distribución Direccional: Es el volumen durante una hora en particular en el sentido predominante expresado como un porcentaje del volumen en ambos sentidos durante la misma hora.

Composición del Tránsito: Vehículos pesados o de transporte público expresados (excluyendo vehículos livianos, con una relación peso/potencia similar a vehículos privados) como un porcentaje del volumen horario de diseño.

2. USOS DE LOS DATOS DE VOLÚMENES DE TRÁNSITO

La información sobre volúmenes de tránsito es de gran utilidad en la planeación del transporte, diseño vial, operación del tránsito e investigación. Varios tipos de estudios de volúmenes y sus aplicaciones se ilustran en la siguiente tabla.

Tabla de Aplicaciones de Estudios de Volúmenes

TIPO DE VOLUMEN	APLICACIÓN
Volumen Medio Diario: (VMD) o volumen total de tránsito	Estudios de tendencias; Planeación de Carreteras; Programación de Carreteras; Selección de Rutas; Cálculo de Tasas de Accidentes; Estudios Fiscales; Evaluaciones Económicas
Volúmenes Clasificados: por tipo de vehículo, número de ejes, y/o peso.	Análisis de Capacidad; Diseño Geométrico; Diseño Estructural; Cómputos de Estimados de recolección de impuesto de los usuarios de vialidades
Volúmenes durante periodos de tiempo específicos: durante horas pico, horas valle, y por dirección.	Aplicación de Dispositivos de Control del Tránsito; Vigilancia Selectiva; Desarrollo de Reglamentos de Tránsito; Diseño Geométrico.

3. MÉTODOS DE MUESTREO

A continuación se enumeran las modalidades más comúnmente usadas para aforos de tránsito.

Aforos Manuales:

- Se usan por lo general para contabilizar volúmenes de giro y volúmenes clasificados.
- La duración del aforo varía con el propósito del aforo. Algunos aforos clasificados pueden durar hasta 24 horas.
- El equipo usado es variado; desde hojas de papel marcando cada vehículo hasta contadores electrónicos con teclados. Ambos métodos son manuales.
- Durante periodos de tránsito alto, es necesario más de una persona para efectuar los aforos. La exactitud y confiabilidad de los aforos depende del tipo y cantidad del personal, instrucciones, supervisión y la cantidad de información a ser obtenida por cada persona.

Contadores Mecánicos:

- Contadores permanentes son usados para aforar el tránsito continuamente. Es usado a menudo para estudios de tendencias. Pueden ser actuados por células fotoeléctricas, detectores magnéticos y detectores de lazo.

Contadores Portátiles:

- Toman nota de los volúmenes aforados cada hora y 15 minutos, dependiendo del modelo. Pueden ser tubos neumáticos u otro tipo de detector portátil. Entre sus ventajas se cuentan: una sola persona puede mantener varios contadores y, además, proveen aforos

permanentes de todas las variaciones del tránsito durante el periodo del aforo. Entre sus desventajas se cuentan: no permiten clasificar los volúmenes por tipo de vehículo y movimientos de giro y muchas veces se necesitan aforos manuales ya que muchos contadores (en particular los de tubo neumático) cuentan más de un vehículo cuando son accionados por vehículos de más de un eje o por vehículos que viajen a velocidades bajas.

Programación de los Aforos

El número de horas de aforo varía con el método usado y el propósito. Los contadores mecánicos pueden estar contando las 24 horas del día. Es conveniente que los aforos manuales en intersecciones, se lleven a cabo por un mínimo de 12 horas, incluyendo en este espacio de tiempo las horas de mayor demanda. Aforos por periodos de tiempo de 16 horas, proveen más información. Por lo general, para la mayoría de los propósitos de ingeniería de tránsito, los aforos deben ser efectuados durante días representativos de un día de la semana típico (martes, miércoles y jueves) a menos que el objetivo del estudio requiera días de fin de semana. Por lo general aforos realizados con incrementos de tiempo de 15 minutos son suficientes. Sin embargo, algunas veces es necesario efectuar aforos en intervalos menores para el diseño de carriles de giro y para cálculo de tiempos de semáforos.

Aforos de Cordón

Se entiende por este tipo de aforos a la contabilización de todos los vehículos y las personas que entran o salen de una zona (área acordonada) durante un día típico. Este tipo de estudio se usa para :

- Apoyar el desarrollo de estacionamientos adecuados
- Proveer las bases para la evaluación y la introducción de técnicas operacionales de tránsito (dispositivos de control, reglamentos, etc.).
- Como apoyo a las compañías de transporte público, para que estas ajusten sus servicios a las necesidades del área.
- Como apoyo a la policía de tránsito, en planificar actividades selectivas de vigilancia.
- Obtención de datos para estudios de tendencias, etc.

Una línea de cordón define el área. Sin embargo, el número de estaciones a aforar se puede minimizar usando barreras naturales (ríos, etc.). Todas las calles que crucen la línea de cordón son estaciones de aforos con la excepción de calles con volúmenes tan bajos que sean despreciables. Por lo general, los aforos se llevan a cabo en periodos de media hora entre la 7:00 AM y las 7:00 PM.

Para resumir los resultados de los aforos de cordón, se usan curvas de acumulación. Este tipo de curvas indican la acumulación de vehículos y/o pasajeros dentro de una área acordonada. También indican los movimientos hacia adentro y hacia afuera del área y el modo de viaje en diversos periodos de tiempo.

Presentación de Datos de Volúmenes de Tránsito

Los volúmenes de tránsito se pueden resumir de diversas formas. A continuación se enumeran las más comunes.

Mapas con Volúmenes de Tránsito: La figura 2.1 ilustra este tipo de sumario. En ellos se indican los volúmenes a lo largo de rutas seleccionadas, con el ancho de una banda que esta en función de la magnitud del volumen.

Diagramas de Volúmenes de Tránsito Direccionales en Intersecciones: La figura 2.2 ilustra estos diagramas. En ellos se indican la dirección y el volumen correspondientes a todas las direcciones.

También se utilizan planos y gráficos para representar volúmenes (ver figura 2.3).

Figura 2.1. Mapa con Volúmenes de Tránsito

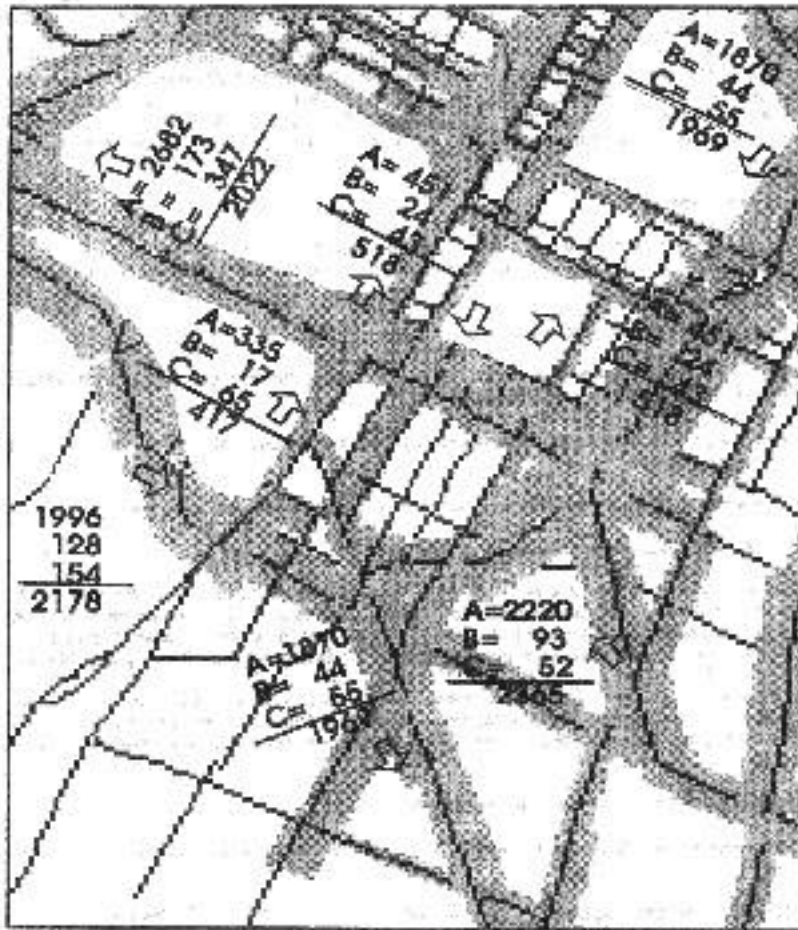
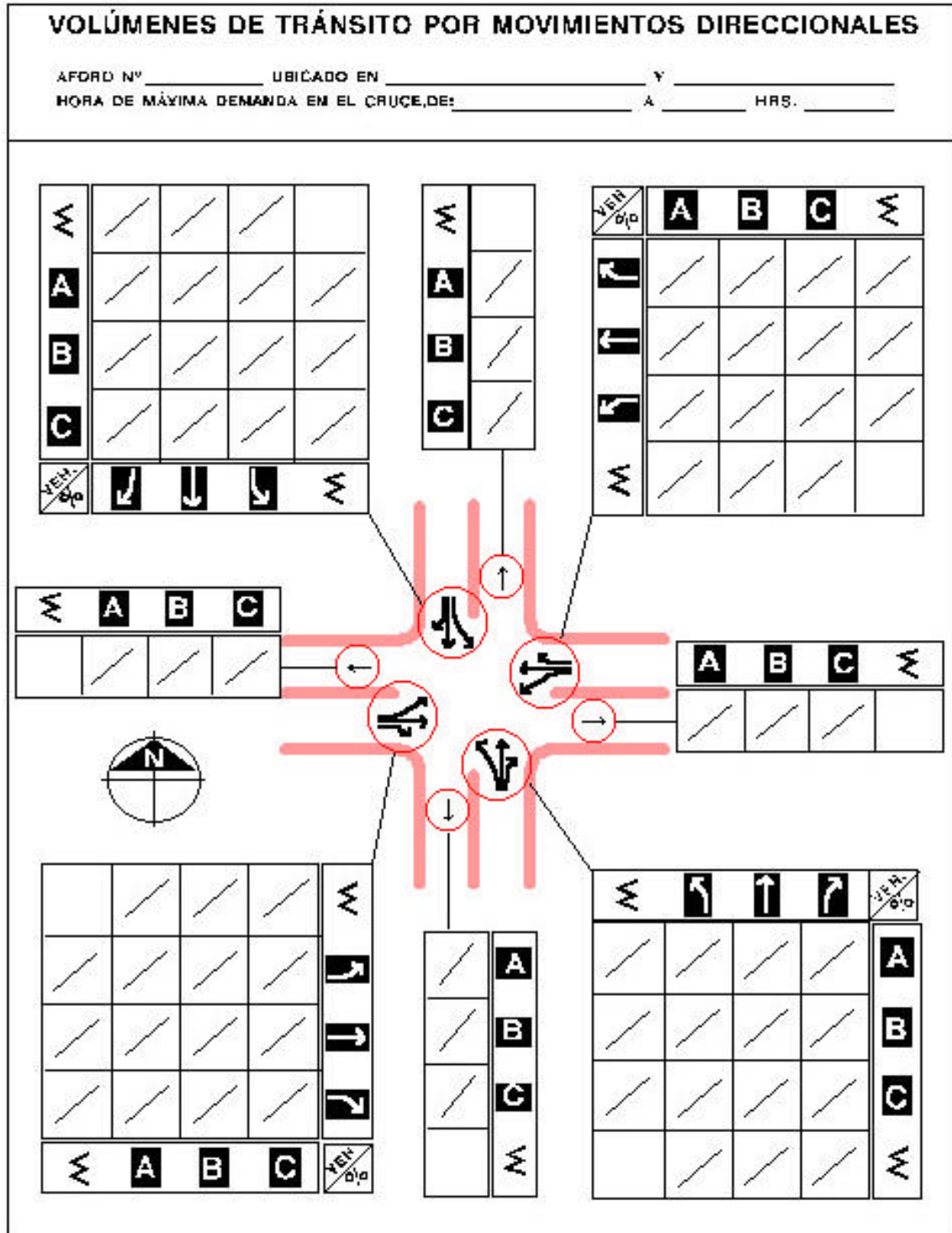
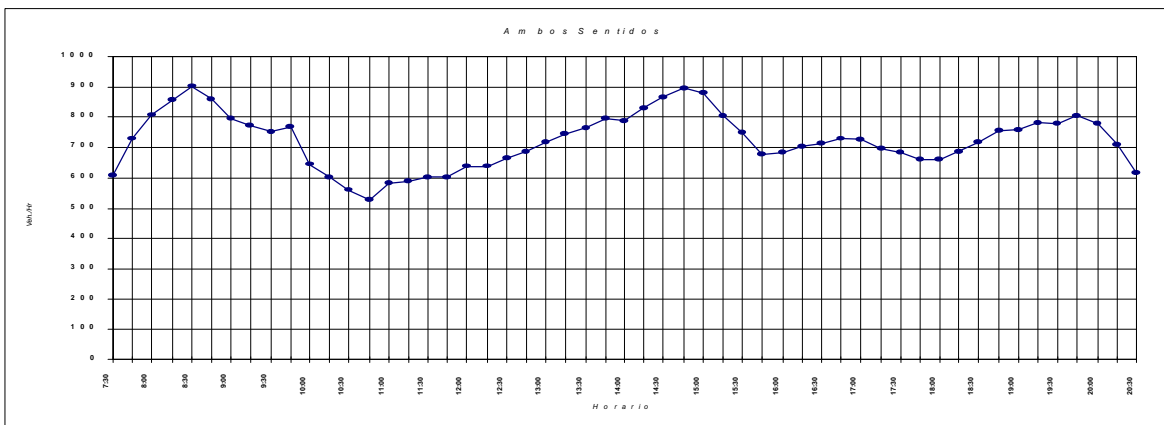
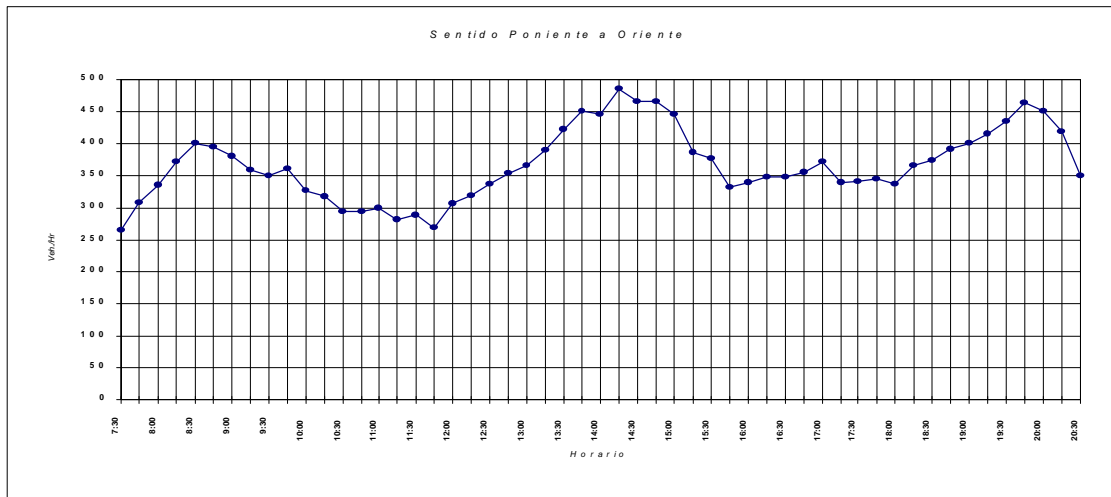
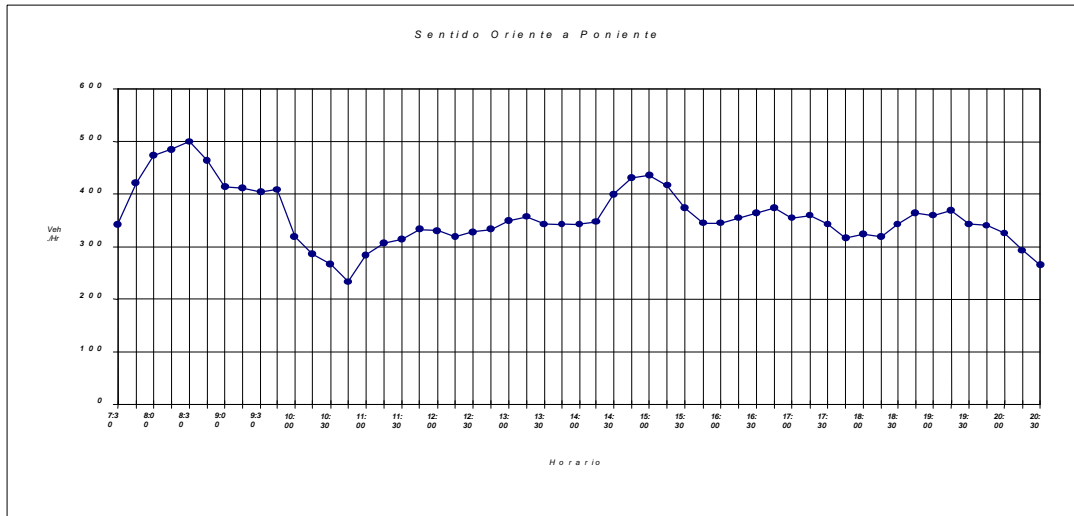


Figura 2.2 Diagrama de Volúmenes de Tránsito Direccionales de una Intersección, Hora de Máxima Demanda



Estudios de Volúmenes

Figura 2.3. Gráficos indicando Fluctuaciones Diarias de Volúmenes de Tránsito



CAPITULO III DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES INSTANTÁNEAS EN LA VÍA

Velocidad instantánea en la vía es la tasa de movimiento del tránsito o de un número específico de vehículos, por lo general expresado en kilómetros por hora. Existen dos tipos de medidas de velocidades medias para expresar la tasa de movimiento. El primer tipo es la velocidad media instantánea, que es la media de las velocidades instantáneas de un grupo de vehículos en un lugar determinado de la vía. El segundo tipo es la velocidad de viaje, que esta sujeta a los tiempos de viaje y demoras.

Los estudios de velocidades instantáneas son diseñados para medir las características de la velocidad en ubicaciones específicas bajo las condiciones prevalecientes de tráfico y ambientales durante el estudio. Es necesario también obtener una muestra lo suficientemente grande de manera que los resultados sean estadísticamente significantes.

1. APLICACION DE ESTUDIOS DE VELOCIDADES INSTANTÁNEAS

Las características de velocidades instantáneas son usadas en muchas actividades de la ingeniería de tránsito, entre las cuales se encuentran:

1. Determinación de las reglamentaciones y equipos adecuados para el control de tránsito:

- a. Límites de velocidad máximos y mínimos.
- b. Zonas de "no pase"
- c. Rutas, zonas y cruces escolares
- d. Ubicación de semáforos y/o detectores
- e. Ubicación de señalización de tránsito

Nótese que en la ubicación y requisitos para la instalación de semáforos se utiliza el 85% de las velocidades instantáneas de los vehículos. Esta es la velocidad que es excedida sólo el 15% de las veces.

2. Estudio de zonas con alta accidentalidad para determinar el tratamiento correctivo apropiado.

3. Análisis de áreas críticas donde los problemas sean evidentes o para los cuales se hayan recibido quejas.

4. Evaluación de la efectividad de mejoras de tránsito mediante estudios de "antes y después".

5. Determinación de zonas para ser vigiladas selectivamente e investigar la efectividad de actividades de vigilancia de tránsito.

6. Selección de elementos en el diseño geométrico de carreteras:

- a. Velocidad de diseño para establecer las relaciones velocidad-curvatura-peralte y velocidad-pendiente-longitud de pendiente.

- b. Velocidad instantánea de manera que permita el diseño detallado de elementos críticos como intersecciones, cruces y carriles de cambios de velocidad.
7. Establecimiento de tendencias de velocidad para diferentes tipos de vehículos mediante muestreos periódicos de flujo discontinuo de tránsito en áreas seleccionadas.
8. Cálculo de costos operacionales en los análisis económicos de carreteras y mejoras al tránsito.
9. Estudios de investigación que involucren flujos de tránsito.

2. UBICACIÓN DE LOS ESTUDIOS

Los estudios de velocidades instantáneas se pueden hacer en ubicaciones generales o especiales.

Ubicaciones Generales: Son aquellas seleccionadas para estudios de tendencias o datos de encuestas básicas de tránsito. Para carreteras rurales, los estudios de tendencias se llevan a cabo en secciones rectas y sin pendiente lejos de intersecciones o desarrollos a los lados de la vía.. En áreas urbanas se seleccionan ubicaciones a media cuadra, sin la influencia de estacionamientos y accesos.

Ubicaciones Especiales: Son aquellas seleccionadas para establecer límites de velocidad para calles específicas y secciones de vía, para evaluar mejoras de tránsito y para estudiar zonas de accidentes. Además, los estudios de velocidades instantáneas se llevan a cabo en determinadas áreas para investigación y otros estudios especiales, o para evaluar la relación entre la velocidad y factores que puedan afectarla.

Para estimar la velocidad instantánea en una zona de manera precisa y no sesgada, se debe proceder de la siguiente forma:

1. El equipo de medición debe ser escondido de manera que el conductor no sepa que está siendo medido.
2. Si el observador necesita ver los vehículos, también debe esconderse.
3. Evitar tener público observando el aforo.
4. Chequear un número adecuado de velocidades de vehículos.

3. REQUERIMIENTOS DEL TAMAÑO DE LA MUESTRA

Un estudio de velocidades instantáneas requiere un tamaño de muestra adecuado para satisfacer consideraciones estadísticas. La siguiente ecuación puede ser usada para calcular el número de velocidades a ser medidas:

$$N = \left(\frac{SK}{E} \right)^2$$

Distribución de Velocidades Instantáneas en la Vía

donde,

N = tamaño mínimo de la muestra

S = desviación estándar estimada de la muestra (KPH)

K = constante que corresponden al nivel de confianza deseado

E = error permitido en el estimado de la velocidad

Si la desviación estándar de las velocidades instantáneas no ha sido determinada en análisis de velocidad previos, entonces se puede hacer un estimado razonable usando el cuadro 3.1 de acuerdo con el área de tránsito y el tipo de vía.

Cuadro 3.1 Desviaciones Estándar de Velocidades Instantáneas para Determinar el Tamaño de la Muestra y Sentido

Área de Tránsito	Tipo de Carretera	Desviación Estándar Media (kph)
Rural	2 carriles	8,5
Rural	4 carriles	6,8
Intermedio	2 carriles	8,5
Intermedio	4 carriles	8,5
Urbana	2 carriles	7,7
Urbana	4 carriles	7,9
Valor Redondeado		8,0

Nótese que la desviación estándar media varía entre 7.9 y 8.5 KPH para las seis combinaciones de tipos de área de tránsito y tipo de carretera. Debido a que la variabilidad en las medidas de la dispersión de la velocidad es limitada, se sugiere que se use un valor de 8.0 KPH para cualquier tipo de carretera y área de tránsito.

La constante K depende del nivel de confianza (la probabilidad que la velocidad media sea una estimación válida). Un valor de 2.00 se usa a menudo y proporciona un nivel de confianza de 95.5 %. Si un nivel de confianza mayor es requerido, un valor para K=3 establece un nivel de confianza del 99.7%. Valores adicionales para la constante K se presentan en el cuadro 3.2.

Cuadro 3.2 Constantes Correspondientes al Nivel de Confianza

Constante, K	Nivel de Confianza (%)
1,00	68,3
1,50	86,6
1,64	90,0
1,96	95,0
2,00	95,5
2,50	98,8
2,58	99,0
3,00	99,7

El error permitido "E" en el estimado de la velocidad depende de la precisión requerida en el estimado de la velocidad media. Esta medida es una tolerancia absoluta, esto quiere decir

que el error absoluto se especifica como +/- un valor seleccionado. La ecuación anterior determina el número mínimo de observaciones necesarias, sin embargo, bajo ninguna circunstancia, el tamaño de la muestra puede ser menor que 30.

Si la estadística de interés es un valor diverso a la media, como por ejemplo el 85 percentil de las velocidades, entonces la siguiente ecuación es la apropiada para determinar el tamaño requerido de la muestra:

$$N = \frac{S^2 K^2 (2 + U^2)}{2E^2}$$

donde,

N = tamaño de la muestra mínimo

S = desviación estándar estimada para el muestreo

K = constante correspondiente para el nivel de confianza deseado

E = error permitido en el estimado de la velocidad (KPH)

U = constante correspondiente a la estadística de velocidad deseada; para velocidad media, use 0,00; para el 15 o 85 percentil, use 1,04; para el 5 o 95 percentil, use 1,64.

4. PROCEDIMIENTO

En la recolección de datos, se deben tener en cuenta una serie de factores. Todas las medidas de velocidad en el campo deben ser aleatorias y representativas de las condiciones de flujo libre en el flujo de tránsito. Se recomiendan los siguientes procedimientos para el muestreo:

1. Observar siempre el primer vehículo en un pelotón o columna, ya que los vehículos que siguen pueden estar viajando a la velocidad del primer vehículo por no poder pasarlo.
2. Seleccionar vehículos pesados en la misma proporción de su presencia en el flujo de tránsito.
3. Evitar el muestreo de una proporción muy alta de vehículos que viajen a altas velocidades.

Si la persona encargada de la recopilación de datos de velocidad no puede aforar todos los vehículos en el flujo de tránsito por ser volúmenes muy altos, entonces puede usar varios métodos de muestreo. Se pueden seleccionar para medir la velocidad cada segundo, tercero o enésimo vehículo. Ciertas precauciones deben ser tomadas con este procedimiento, ya que la velocidad del enésimo vehículo puede estar controlada por efectos externos, como las columnas de vehículos a través de un sistema coordinado de semáforos.

Análisis de Datos y Suma de Estadísticas

Las suma de los datos de velocidades instantáneas se hacen de acuerdo al propósito del estudio. Por lo general se usa la velocidad promedio, y la 85 percentil. Los análisis de datos y otros suma estadísticos se detallan en el capítulo de análisis estadístico.

CAPITULO IV. TIEMPOS DE VIAJE Y DEMORAS

A menudo, la eficiencia de sistemas de tránsito se evalúa en términos de velocidad de los vehículos. Existen dos tipos de velocidades medias para medir la tasa de movimiento del tránsito. El primer tipo, velocidades instantáneas, ya fue descrito anteriormente. La segunda expresión de velocidad media en una vía es la velocidad media de viaje, que se calcula como la distancia de viaje dividida por el tiempo promedio de viaje de varios viajes sobre la vía en estudio.

Los propósitos de los estudios de tiempos de viaje y estudios de demora son para evaluar la calidad del movimiento de tránsito a lo largo de una ruta y para determinar la ubicación, tipo y alcance de las demoras de tránsito. La eficiencia del flujo de tránsito se mide en función de las velocidades de viaje y recorrido.

Las informaciones de demora son tomadas cuando el flujo de tránsito se encuentra parado o con retardo excesivo. La duración de la demora de tránsito es medida en unidades de tiempo, anotando la ubicación correspondiente, la causa y la frecuencia de demoras en el viaje.

1. APLICACIONES

Los resultados de tiempos de viaje y demora son de utilidad en la evaluación general de movimientos de tránsito dentro de una área o a lo largo de una ruta seleccionada. Datos de demora ayudan al ingeniero de tránsito a definir las localidades con problemas donde las mejoras de diseño y operacionales son esenciales para incrementar la movilidad y la seguridad. A continuación se presenta una lista de aplicaciones para la información de tiempos de viaje y demoras:

1. Determinación de la eficiencia de una ruta para mover tránsito.
2. Identificación de localidades congestionadas en los sistemas viales
3. Definición de la congestión acorde a la localidad, tipo de demora, la duración y la frecuencia de la fricción de tránsito.
4. Evaluación de las mejoras al tránsito mediante el uso de estudios de "antes y después".
5. Cálculo de costos del usuario en la evaluación económica de vías y mejoras al tránsito.
6. Establecimiento de las tendencias de las velocidades de viaje mediante el muestreo de rutas principales.
7. Cálculo de volúmenes de servicio y capacidades para tránsito discontinuo.
8. Establecimiento de velocidades o tiempos de viaje a lo largo de segmentos para la aplicación de modelos de distribución de viajes y/o asignación de viajes en planeación de transporte.

A continuación se definen algunos conceptos necesarios.

Tiempo de viaje: Tiempo que dura un vehículo para transitar por un segmento de vía.

Tiempo de recorrido: Tiempo durante el cual el vehículo esta en movimiento.

Velocidad: Tasa de movimiento del vehículo en distancia por unidad de tiempo.

Velocidad de viaje: La distancia dividida por el tiempo de viaje total, incluyendo el tiempo de recorrido y los tiempos de demora.

Velocidad de recorrido: Distancia de viaje dividida por el tiempo de recorrido.

Velocidad media de viaje: La distancia dividida por el valor medio de los tiempos de viaje de diversos viajes sobre un segmento determinado de vía.

Velocidad media de recorrido: Distancia de viaje dividida por el valor medio de los tiempos de recorrido sobre un segmento determinado de vialidad.

Demora: Tiempo de viaje perdido debido a fricciones del tránsito y dispositivos para el control del tránsito.

Demoras Fijas: Componente de demoras que es causado por los dispositivos del control de tránsito, independientemente de los volúmenes de tránsito e interferencias presentes.

Demoras Operacionales: Componente de las demoras que es causado por la presencia e interferencia de otros vehículos.

Demoras de tiempo parado: Componente de la demora durante el cual el vehículo no está en movimiento.

Demoras de tiempo de viaje: Diferencia entre el tiempo de viaje total y el tiempo calculado basado en atravesar la ruta en estudio a una velocidad media correspondiente a un flujo de tránsito descongestionado sobre la ruta.

2. REQUERIMIENTOS DEL TAMAÑO DE LA MUESTRA

El tamaño de la muestra para estudios de velocidades de viaje y demoras depende de las necesidades específicas para las cuales la información haya sido recopilada. A continuación se sugieren ciertos rangos para errores permitidos en el estimado de la velocidad media de viaje para diferentes estudios.

1. Planeación de transporte y necesidades para los estudios en carreteras - +/- 5,0 a +/- 8,0 kph
2. Operaciones del tránsito, análisis de tendencias y evaluaciones económicas - +/- +/- 3,5 a +/- 6,5 kph
3. Estudios de antes y después - +/- 2,0 a +/- 5,0 kph

A pesar de que la determinación de los requerimientos para el tamaño de la muestra para tiempos de viaje y demoras es dificultosa, la información que se presenta en el cuadro 4.1 da valores aproximados para diseñar estudios de demora y de tiempo de viaje. Usando el siguiente cuadro, se determina el tamaño aproximado del muestreo para cada dirección de viaje, después de haber determinado el error permitido de la muestra de acuerdo con el propósito del estudio.

Después que el primer grupo de velocidades de viaje ha sido observado, se obtiene un conjunto de diferencias absolutas entre el primer y el segundo valor, el segundo y el tercer valor, etc. Estas diferencias se suman y el total se divide entre el número de diferencias, de esta manera se calcula la media del rango en velocidades de viaje para los datos iniciales. Este procedimiento es representado por la siguiente ecuación:

$$R = \frac{\sum S}{N - 1}$$

donde,

R = rango medio en velocidades de viaje (kph)

S = sumatoria de los valores de las diferencias en velocidad

N = número de recorridos

El rango medio en velocidades de recorrido se calcula usando la ecuación anterior después que el primer conjunto de velocidades ha sido aforado utilizando la técnica del vehículo flotante. El tamaño mínimo aproximado de la muestra se obtiene usando la tabla 4.1 para el valor medio del rango de velocidades y el error permitido deseado. Si el tamaño de la muestra requerido es mayor que el número inicial de recorridos, entonces se deben hacer recorridos adicionales bajo condiciones similares a las iniciales.

Cuadro 4.1 Requerimientos aproximados del tamaño mínimo del muestreo para tiempos de viaje y estudios de demora con un nivel de confianza del 95%

Rango Medio Velocidades Viaje (kph)	Número Mínimo del Muestreo para el Error Permitido Especificado				
	+/- 2,0 kph	+/- 3,5 kph	+/- 5,0 kph	+/- 6,5 kph	+/- 8,0 kph
5,0	4	3	2	2	2
10,0	8	4	3	3	2
15,0	14	7	5	3	3
20,0	21	9	6	5	4
25,0	28	13	8	6	5
30,0	38	16	10	7	6

3. MÉTODO DEL VEHÍCULO DE PRUEBA

Este método ofrece gran flexibilidad para evaluar la calidad del flujo del tránsito. En este método, un vehículo se maneja a lo largo de una ruta en estudio de acuerdo con una de las siguientes condiciones de operación:

1. Técnica del vehículo flotante: El vehículo de prueba "flota" en el flujo tránsito, pasando tantos vehículos como los que lo pasan.
2. Técnica del vehículo medio: En esta técnica el vehículo viaja de acuerdo a la apreciación que tenga el conductor de la velocidad predominante en el flujo de tránsito.
3. Técnica del vehículo máximo: En esta técnica el vehículo viaja al límite de la velocidad para la vía en particular, a menos que el tránsito no lo permita.

Antes de comenzar los recorridos, se deben identificar los puntos iniciales y finales de manera que el vehículo de prueba sea manejado por estos lugares de acuerdo con las condiciones operacionales seleccionadas. Intersecciones importantes y otros puntos de control son seleccionados a lo largo de la ruta en estudio como puntos de referencia. En estas estaciones se anota el tiempo, de manera que se pueda calcular la velocidad en estos segmentos a lo largo de la ruta. La información durante el estudio se anota en una hoja de campo, como la

4. ANÁLISIS DE DATOS Y SUMARIO DE ESTADÍSTICAS

En el análisis de tiempos de viaje, las medidas de tiempo son convertidas en velocidades medias de viaje. Se pueden desarrollar diversos tipos de sumarios de estadísticas de acuerdo a las terminologías de tiempos de viajes y demoras presentadas al inicio de este capítulo. Los sumarios usados dependen del tipo de estudio y su finalidad. Como se mencionó anteriormente, el método del vehículo prueba ofrece alta flexibilidad en la determinación de las velocidades de viaje y demoras. Se pueden desarrollar sumarios de estadísticas para varias secciones de vías entre puntos de control seleccionados y para toda la ruta en estudio. Las velocidades de viaje y de recorrido se calculan a partir de los tiempos totales de viaje y de recorrido, aplicando las ecuaciones que se presentan a continuación.

Las velocidades de viaje se calculan a partir del tiempo de recorrido mediante la fórmula siguiente:

$$S = \frac{60D}{T}$$

donde,

S = velocidad de viaje (kph)

D = longitud de la ruta en estudio o sección (kilómetros)

T = tiempo de viaje (min)

La velocidad media de viaje se puede calcular usando la ecuación siguiente:

$$S = \frac{60ND}{\sum T}$$

donde,

S = velocidad de viaje (kph)

D = longitud de la ruta en estudio o sección (kilómetros)

T = tiempo de recorrido (min)

N = número de viajes de prueba.

5. ESTUDIOS DE DEMORAS EN INTERSECCIONES

Aplicación

A continuación se enumeran las aplicaciones de estudios de demoras en intersecciones:

1. Evaluación de la eficiencia de diversos tipos de control del tránsito en intersecciones.
2. Desarrollo de secuencias de tiempos de semáforos apropiadas.
3. Determinación de la necesidad de un semáforo en una intersección determinada.
4. Cálculos del costo de las demoras en la evaluación económica de mejoras a la vialidad.
5. Evaluación de la geometría de la intersección.
6. Análisis de la efectividad de mejoras al tránsito usando estudios de antes y después.
7. Investigación relacionada con el flujo del tránsito en intersecciones

Métodos para Medir Demoras en Intersecciones

Métodos de Tiempos de Viaje: Miden el tiempo de viaje desde un punto antes de la intersección hasta un punto después de ésta. Entre estos métodos figuran los discutidos en secciones anteriores, como el método del vehículo flotante, etc.

Métodos de Tiempo durante el cual el vehículo permanece parado: Estos métodos miden sólo las demoras durante las cuales el vehículo permanece parado. Reducciones de velocidad no son consideradas en este método. El procedimiento se describe a continuación:

- Contar el número de vehículos que se paran en un afluente de la intersección en intervalos sucesivos.
- Contar el volumen del afluente, incluyendo los vehículos que paran y los que no paran.

Los siguientes valores se calculan usando las siguientes fórmulas:

Demora total de tiempo parado (veh-seg.)

$$DTP = (VTP) \times (IM)$$

donde, DTP = demora total de tiempo que los vehículos permanecen parados

VTP = volumen total de los vehículos que se paran en el afluente durante el muestreo

IM = Intervalo del muestreo

Demora media de los vehículos que se paran (seg.)

$$DMP = \frac{DTP}{VTP}$$

donde, DMP = demora media de los vehículos que se paran

Demora media de parada para todos los vehículos en el afluente (seg)

$$DMPT = \frac{DTP}{VT}$$

donde, DMPT = demora media de parada para todos los vehículos en el afluente.

VT = volumen total aforado en el afluente durante el muestreo.

Tiempos de Viaje y Demoras

Porcentaje de vehículos que paran (%)

$$\%VP = \left(\frac{VTP}{VT} \right) \times 100$$

donde, %VP = porcentaje total de los vehículos que se paran durante el muestreo.

El procedimiento anterior se ilustra con un ejemplo:

ESTUDIO DE DEMORAS EN INTERSECCIONES

Intersección: Calle 20 con 69 Afluente: Norte Giros: todos No. de carriles: 2
Tiempo de fase verde: 30 seg. Longitud de Ciclo: 60 seg. Clima: soleado

TIEMPO en minutos	NÚMERO TOTAL DE VEHÍCULOS PARADOS EN EL AFLUENTE EN EL INSTANTE DE OBSERVACIÓN				VOLUMEN TOTAL DEL AFLUENTE	
	Hora Inicio	+ 0	+ 15	+ 30	+ 45	No. que paran
8:00 AM	0	0	2	6	8	10
01:10	2	0	4	4	10	9
02:20	3	3	6	0	12	15
03:30	1	4	0	5	10	8
04:40	0	5	0	1	5	11
05:50	9	1	2	6	15	12
06:00	3	0	7	0	10	7
07:10	1	2	6	2	9	8
08:20	5	7	5	0	16	13
09:30	4	3	6	9	18	26
SUBTOTAL	28	25	38	33	113	119
TOTAL	124				232	

Demora Total de Tiempo parado, DTP = 124 x 15 = 1860 veh-seg

Demora media de vehículos que se paran, DMP = 1860/113 = 16.5 seg.

Demora media de parada para todos los vehículos en el afluente,

$$DMPT = 1860/232 = 8.0 \text{ seg}$$

Porcentaje de vehículos que se paran durante el muestreo,

$$\% VP = (113/232) \times 100 = 49 \%$$

CAPITULO V. ESTUDIO DE ESTACIONAMIENTOS

El estacionamiento es uno de los elementos esenciales del transporte urbano. Hay dos tipos generales de estacionamiento; éstos son:

1. Estacionamiento ofrecido por propietarios en viviendas, negocios, oficinas, etc. Dentro de esta categoría se incluye el estacionamiento sobre la vía pública que no es controlado por parquímetros o algún otro tipo de control.
2. Estacionamiento comercial, que incluye lotes privados o estacionamientos donde se paga por uso. También incluye estacionamiento de pago sobre la vía y estacionamientos públicos privados.

Los estudios de estacionamientos tienen dos objetivos fundamentales:

- Establecer requerimientos de estacionamiento (para zonas o desarrollos específicos).
- Para revisar las necesidades físicas para evaluar o incrementar la oferta de estacionamiento.

El estacionamiento sobre la vía pública es el causante de problemas en muchas áreas urbanas, como por ejemplo accidentes, congestión, reducción de la capacidad vial, etc.

1. INVENTARIOS DE ESTACIONAMIENTOS

Descripción y Uso

Un inventario de estacionamientos es una recopilación de información de la ubicación, capacidad y otras características relacionadas a los espacios de estacionamiento sobre y fuera de la vía pública. Por lo general, la información necesaria es la siguiente:

1. Capacidad (número de espacios)
2. Limite de tiempo y horas de operación
3. Propiedad (público, privado, solo para empleados o clientes de algún negocio determinado)
4. Tasas (si existen) y sistema de cobranza.
5. Tipo de regulación de los espacios sobre la vía pública (zona de carga y descarga, zona de pasajeros, zona de taxis, o autobuses)
6. Tipo de estacionamiento (elevado o terreno destinado a estacionamiento)

Ubicación de Estudios

Si el área del inventario es un casco central, el estudio debe incluir el área donde la mayoría de los empleados que trabajan en el centro (de todas las actividades: comercial, financiera, etc.) y personas que vayan al centro por algún servicio, vayan a estacionarse. Si el estudio es en área de negocios de algún vecindario en particular, entonces se puede esperar que el estacionamiento se extienda aproximadamente 150 m. fuera de los límites de la zona comercial. Sin embargo, esto puede variar y es necesaria una inspección del campo para determinar el área a estudiar.

Método

A continuación se hacen sugerencias sobre la metodología a seguir.

Un sistema para codificar los datos es necesario. A cada cuadra se le da un número de identificación. Una vez que los números para las cuadras hayan sido seleccionados, entonces usar los números del 1 al 4 para cada uno de los lados (aceras) de la cuadra. En caso de cuadras de más lados, usar más números; cada acera debe ser identificada. Números mayores a los utilizados en la identificación de aceras, se pueden usar para identificar estacionamientos individuales o fuera de la vía en cada cuadra.

En el inventario, debe aforarse toda la cantidad de estacionamiento sobre y fuera de la vía (para cada estacionamiento). Toda la información debe ser vaciada sobre un plano a una escala conveniente.

El inventario de cada una de las aceras debe identificar el estacionamiento en batería o cordón, la existencia de parquímetros u otro tipo de cobro, horas de estacionamiento permitidas, prohibición de estacionamiento, etc. La ubicación de entradas particulares debe ser también aforada.

Si el estacionamiento sobre la vía no está demarcado, es necesario medir la longitud de la acera destinada a estacionamiento (sin incluir entradas particulares, hidrantes y prohibiciones de estacionamiento). Estimaciones del número de estacionamientos para cada acera se pueden hacer utilizando los siguientes valores:

Estacionamiento paralelo	7.0 m.
Estacionamiento en batería	4.0 m.
Estacionamiento perpendicular	3.0 m.

Estas dimensiones son conservadoras y la capacidad de estacionamiento sobre la vía quizás sea mayor que la calculada con estos valores.

La capacidad de estacionamiento fuera de la vía y garajes es variable y depende de la operación del estacionamiento.

Los resúmenes de los estacionamientos cuadra por cuadra son tabulados en cédulas de inventario como la que se presenta en la cédula 5.1. A menudo se usan también planos. En estas cédulas se incluyen estacionamientos públicos y públicos por pago (éstos pueden ser privados y ser rentados al público), sobre la vía y fuera de la vía. No se incluyen estacionamientos sólo para empleados, ya que éstos no pueden ser usados por el público en general. El inventario debe tener información de la existencia de áreas donde se puedan ubicar estacionamientos adicionales.

Estudios del Uso de Estacionamiento

Hay dos tipos generales de estudios de uso de estacionamientos:

- Estudios de acumulación o generación
- Chequeo de placas.

Los chequeos de ocupación son útiles para determinar la necesidad de mejorar la carga y descarga de mercancía. Estacionamiento doble de vehículos de carga puede indicar la necesidad de vigilancia de manera que los vehículos de carga obedezcan las reglamentaciones de carga y descarga o que los vehículos privados respeten la prohibición de estacionarse en áreas destinadas a ello. Este tipo de chequeos es también útil para evaluar el impacto de cambios del control de estacionamientos en la vía pública, como por ejemplo la prohibición de estacionamiento para aumentar la capacidad vial o reducir accidentes.

En estudios de acumulación y generación de estacionamiento, el ingeniero de tránsito se interesa fundamentalmente en la relación entre la oferta existente y la demanda pico. Por ejemplo, son de particular interés los aforos durante las horas de mayor demanda a lo largo de corredores donde se intenta restringir el estacionamiento sobre la vía durante las horas de mayor demanda de tránsito.

Revisión o Registro de Placas

Este tipo de registro se usan para observaciones detalladas de estacionamiento sobre la vía. El objetivo principal de este tipo de estudios es la determinación de la rotación de estacionamiento. La rotación se define como el promedio de automóviles que se estaciona en cada espacio de estacionamiento durante el periodo de estudios o durante un periodo dado. La ecuación para rotación, para un periodo dado es:

$$T = (\# \text{ de vehículos diversos estacionados}) / (\# \text{ de espacios de estacionamientos})$$

La revisión de placas provee información con respecto al tiempo de permanencia en estacionamientos, acumulación, estacionamiento ilegal, etc.

El registro de placas es llevado a cabo por individuos a pie, por lo tanto su costo es alto. Debido esto último, se utilizan por lo general técnicas de muestreo. Se seleccionan varias cuadras que sean representativas del área de estudio y el tipo de estacionamiento que se encuentre en el área. Las horas de estudio deseables son de 7:00 AM a 7:00 PM. Los requerimientos de mano de obra para estos estudios depende del "headway" o frecuencia necesaria para iniciar cada ronda de chequeo. Las rondas de registro pueden ser desde cada 15 minutos hasta una hora, dependiendo de la rotación.

Una cédula típica usada en este tipo de estudios se presenta en la cédula 5.2. Se debe utilizar una línea para cada espacio de estacionamiento. Se deben observar todos los vehículos, privados o no, estacionados legalmente o no, siempre identificando si el estacionamiento es ilegal o no. El sumario y el análisis de los registros de las placas puede dar información acerca de la acumulación de estacionamiento. La acumulación de estacionamiento para cada lado de una cuadra se determina contando los automóviles estacionados en un determinado instante. La cédula 5.3 muestra una cédula típica de sumario de permanencia. De esta cédula se puede obtener el tiempo que cada vehículo dura estacionado en un determinado espacio: por ejemplo, si se usan headways o frecuencias de 15 minutos, para un vehículo que se observa solo en una de las rondas de chequeos, se asume que estuvo estacionado solo 15 minutos. Si el vehículo se observa en dos registros sucesivos, entonces se asume un tiempo de estacionamiento de 30 minutos.

Los cuadros 5.1 y 5.2 sirven de comparación de los resultados de las encuestas anteriores con datos estándar obtenidos en estudios realizados. Como regla general, cuando sea posible, se desea proveer como mínimo los valores de duración y rotación que se indican a continuación.

Cuadro 5.1 Longitud de Tiempo en horas de Estacionamiento Promedio para diferentes Propósitos de Viajes

Grupos de Población en Miles hab.	Viajes de Compras	Viajes de Negocios	Viajes de Trabajo	Viajes de Ventas y Servicios	Otros	Todos
5-10	0.5	0.5	2.8	0.5	0.7	1.0
10-25	0.6	0.6	3.1	0.6	0.9	1.1
25-50	0.6	0.7	3.4	0.6	1.0	1.3
50-100	0.7	0.7	3.8	0.6	1.1	1.4
100-250	1.0	0.9	3.8	0.5	1.3	1.6
250-500	1.3	1.1	4.8	0.7	1.4	1.9
500-1000	1.3	1.3	4.8	1.0	1.4	2.2
mas de 1000	1.8	1.5	5.6	1.0	1.9	3.0

Cuadro 5.2 Rotación de Estacionamientos sobre la Vía

Población del Área Urbana	Rotación Promedio de Estacionamiento sobre la Vía
10000-25000	6.7
25000-50000	6.4
50000-100000	6.1
100000-250000	5.7
250000-500000	5.2
500000-1000000	4.5
mas de 1000000	3.8

Nótese que los valores ilustrados en los cuadros anteriores están basados en estudios realizados en los Estados Unidos (ver bibliografía). Valores para México pueden diferir, sin embargo, debido a la carencia de estudios en el país, estos valores pueden ser utilizados como una guía de comparación de los estudios de campo.

Encuestas de Origen y Destino en Estacionamientos

Uso y Descripción

Para determinar los orígenes, destinos, propósitos y distancia a pie, es necesario hacer contacto personal con los choferes que se estacionan. Estas entrevistas pueden ser realizadas llevando a cabo cuestionarios personales. El propósito de las encuestas es investigar el patrón, los destinos y las distancias a pie después de estacionar de manera que se pueda medir la demanda por espacios de estacionamiento bajo la hipótesis que a todo conductor le gustaría estacionar en el lugar de destino del viaje.

Encuestas Personales

Los sitios donde se pueden hacer este tipo de entrevistas es variado. Se pueden llevar a cabo en estacionamientos sobre la vía, en estacionamientos públicos y privados o a la salida de generadores de viajes tales como centros comerciales, edificios de oficinas, hospitales, etc. Las preguntas a serle hechas a los choferes varían de acuerdo a la actividad que realicen (estén entrando o saliendo del estacionamiento, o al origen o destino del viaje). En la figura 5.5 se ilustra una cédula típica que se utiliza para este tipo de entrevistas. Las preguntas incluyen el propósito del viaje, y el destino del chofer. Si el cuestionario se lleva a cabo en un edificio de viviendas, se le debe añadir la pregunta, ¿Reside usted aquí? Se puede preguntar también el tiempo estimado de duración de estacionamiento en el sitio. Es importante notar que las entrevistas pueden resultar costosas y que el personal usado debe estar capacitado en estudios de censo o similares.

Los vehículos que ya están estacionados cuando en el momento que el entrevistador llega, se anotan como si hubieran estado estacionados por un periodo de 5 minutos antes de iniciar la encuesta. Los choferes de estos vehículos son entrevistados cuando regresan a sus vehículos y el estimado del tiempo de permanencia es obtenido, substituyendo el valor usado anteriormente.

En el cuadro 5.3. que se presenta a continuación, se indican las distancias promedio de viaje a pie para choferes que se estacionan, de acuerdo con el propósito del viaje. El segundo cuadro 5.4 indica las distancias que son consideradas aceptables. Ambos cuadros sirven de comparación con los resultados obtenidos por las encuestas de origen y destino. Sin embargo, deben ser usadas solo como guía, ya que los comentarios hechos a los cuadros anteriores también se aplican para estos.

Cuadro 5.3 Distancia Promedio a Pie para Propósitos de Viaje en metros.

Población	Trabajo	Compras	Ventas y Servicios
25000-50000	130	90	70
100000-250000	170	170	70
500000-1000000	220	200	130

Cuadro 5.4 Criterios Sugeridos para Distancias Aceptables a Pie en metros

Población	Distancia a Pie
bajo 25000	100
25000-50000	110
50000-100000	150
100000-250000	170
250000-500000	230
mas de 500000	250

Guía para Estimar la Demanda por Espacios de Estacionamientos en el Centro

A continuación se presenta el cuadro 5.5 que relaciona el tipo de establecimiento en el centro de la ciudad, con el número de estacionamientos que son necesarios.

Cuadro 5.5 Número de Cajones por Tipo de Uso de Suelo

Tipo de Establecimiento	Cajones por cada 100 metros cuadrados	
	Promedio	Rango
Bancos	5.4	1.8-10.8
Bibliotecas	4.1	3.9-4.3
Edificios de Servicios Médicos	3.8	1.1-8.6
Supermercados	3.7	1.4-7.5
Oficinas Municipales	3.6	1.2-6.0
Correos	3.4	2.0-4.9
Oficinas de Utilidades (Agua, Luz)	2.9	0.4-10.7
Farmacias	2.9	1.4-5.5
Tiendas por Departamentos	2.8	1.4-5.1
Tiendas de Ropa	2.5	1.1-6.3
Restaurantes	2.1	0.9-3.3
Oficinas	1.5	0.4-2.9
Tiendas de Variedades	1.1	0.6-1.9
Hoteles	0.6	0.4-1.0

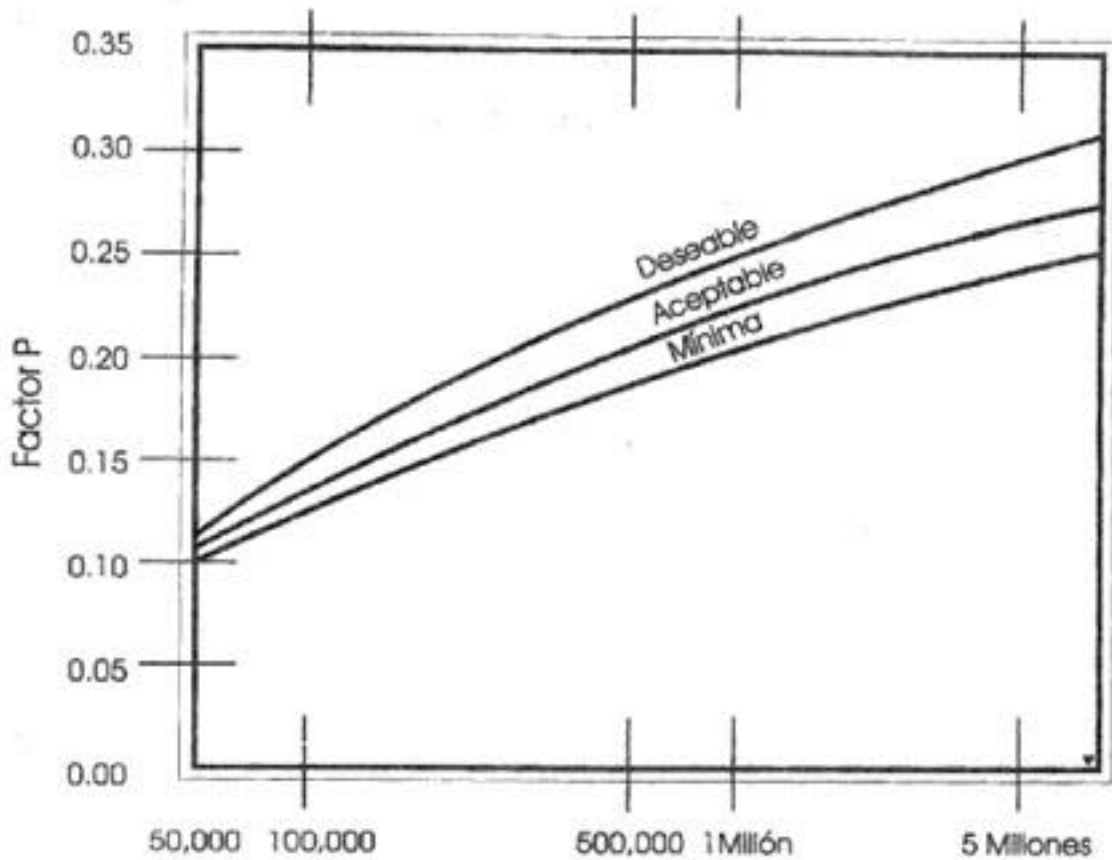
Como se mencionó anteriormente, las tasas aquí indicadas están basadas en estudios realizados en Estados Unidos, donde el uso del transporte público es proporcionalmente mucho menor que en México. Por lo tanto, es posible que las tasas para México sean menores. Sin embargo, hasta no tener una base de datos nacional, las tasas anteriores pueden ser usadas como una guía.

Determinación del Factor de Espacios de Estacionamiento para la Zona Centro

Para estimar el número de espacios necesarios en la zona centro de ciudades entre 50,000 y 10 millones de habitantes, se puede aplicar el procedimiento siguiente:

1. Estimar el número de viajes por persona con destino al centro de la ciudad en un día
2. Estimar el porcentaje de estos viajes que se hace en modalidad automóvil particular
3. Calcular el número de destinos de viajes diarios al centro usando vehículos privados (multiplicar 1 por 2)
4. Leer el valor apropiado de "p" en la Figura 5.5.
5. Calcular el número de espacios requeridos en el centro (multiplicar 3 por 4)
6. Calcular el número adicional de espacios requeridos comparando la demanda por espacios con los espacios disponibles.

Figura 5.5 Factor de Demanda para Espacios de Estacionamientos



Cédula 5.6. Tarjeta de entrevista de estacionamientos.

La cédula 5.6 es usada para determinar sólo las características durante la Hora de máxima demanda. Se deja en los automóviles estacionados para que los conductores las envíen.

ENTREVISTA DE ESTACIONAMIENTOS

Estimado Conductor:

Por favor ayúdenos a mejorar el servicio de estacionamientos en la ciudad respondiendo las siguientes preguntas.

• La razón de estacionarme en esta zona es:

1. Estoy empleado o tengo mi negocio en el centro
2. Estoy de compras (razón principal)
3. Estoy en un viaje de negocios (banco, medico, etc.)
3. Otras razones (por favor especifique) _____

• Después de estacionar mi auto, yo caminé hasta (indique la dirección del edificio visitado)

• Yo manejé hasta este cajón desde (indique donde comenzó el viaje, la intersección más cercana, ciudad)

• Me estacioné en este cajón por un tiempo aproximado de: _____
horas y _____ minutos

• Comentarios

La encuesta anterior tiene el problema de la respuesta, que muchas veces no es muy efectiva. La cédula 5.7 que se presenta a continuación es para efectuar la entrevista personalmente a la hora de llegada o salida del cajón de estacionamiento. Las preguntas exactas varían de acuerdo a la ocasión. La selección de los entrevistadores es esencial.

Las maniobras de estacionamiento bloquean carriles de circulación, además de utilizar un carril de la calzada. Calles locales con calzadas menores de 5 metros requieren de prohibición de estacionamientos todo el tiempo.

Por lo general, se debe dejar un mínimo de 3.50 metros para la circulación de tránsito en un solo sentido y 7 metros para ambos sentidos. El cuadro 5.6 presenta una serie de requerimientos para prohibir el estacionamiento sobre la vía.

Cuadro 5.6 Criterios para la Prohibición de Estacionamientos en Calles Principales

Tipo de Prohibición	Número Máximo de Vehículos por Hora por Carril Cuando el Estacionamiento es Permitido (una dirección de flujo)	
	1 carril	2 o mas carriles
Prohibición en toda la cuadra	400	600
Prohibición en la intersección hasta 50 metros a ambos lados de la intersección (llegada y salida)	300	500

CAPITULO VI. ESTUDIOS DE ACCIDENTES DE TRANSITO

Aún y cuando la mayoría de los accidentes son causados por el comportamiento de conductores y peatones, la probabilidad de accidentes y su severidad puede ser reducida con el uso de equipos para el control de tránsito y un buen diseño geométrico.

El propósito de este capítulo es describir algunas de las técnicas para procesar los datos de accidentes de manera que tengan utilidad en la ingeniería de tránsito. Este capítulo se divide en tres secciones:

1. Sistema de Récord Permanentes
2. Análisis Detallado de Accidentes
3. Cálculo de Índice de Accidentes

1. SISTEMA DE RÉCORD PERMANENTE

Resulta imprescindible obtener todos los reportes de accidentes preparados por el Departamento de Tránsito para procesarlos de manera que sean útiles para el ingeniero de tránsito. La dependencia citada, rutinariamente debe enviar copias de los reportes de accidentes a la oficina encargada de la ingeniería de tránsito.

Reporte de Accidentes (fig 6.1)

Entre los datos de interés para los ingenieros de tránsito se incluye lo siguiente:

1. Ubicación y dirección de viaje antes del accidente, de todos los vehículos participantes en el accidente, incluyendo los que están parados o estacionados.
2. Hora, día de la semana y fecha.
3. Tipo de accidente y forma de la colisión
4. Acciones de los conductores o peatones inmediatamente antes del accidente (estacionar, giros a la izquierda o derecha, etc.)
5. Condiciones de iluminación, condiciones ambientales y de la vía en el momento del accidente.
6. El tipo de dispositivo para el control de tránsito afectando a una o todas las unidades de tránsito involucradas en el accidente.
7. Severidad del accidente (fatal, heridos, o solo daños a la propiedad).

Para los análisis de ingeniería, una de las partes más importantes del reporte (fig. 6.1) son los diagramas del accidente (fig. 6.2) que muestren las trayectorias del viaje de los vehículos inmediatamente antes del accidente.

Archivos de Accidentes

Un reporte de accidentes no tiene utilidad alguna para el ingeniero de tránsito, a menos que pueda identificarse la ubicación del accidente en una intersección o en un punto a lo largo de un segmento de vía. A continuación se describen algunos de los sistemas de ubicación de accidentes mas comúnmente usados.

- 1. Intersección más cercana:** Los accidentes son archivados en carpetas que identifiquen la intersección más cercana al punto donde ocurrió el percance. En este sistema no hay un archivo separado para los accidentes en segmentos de vía.
- 2. Límites Legales de la Intersección:** Son archivados como accidentes en intersecciones aquellos que ocurren dentro de los límites legales de la intersección o a menos de treinta metros (30 m). Los accidentes restantes son archivados como accidentes a media cuadra, identificando la dirección apropiada.
- 3. Regla del Medio Kilómetro:** Igual a la anterior exceptuando la distancia. Este método es predominantemente usado en medios rurales.
- 4. Progresiva:** También en zonas rurales, se utiliza la progresiva más cercana al accidente para su ubicación.
- 5. Elementos Contribuyentes:** Este sistema toma en consideración la relación directa o potencial de los accidentes en cada intersección con elementos que pueden contribuir al accidente. Entre los elementos contribuyentes se pueden incluir los equipos de control de tránsito, movimientos de cruce de cada uno de los vehículos involucrados con respecto a las calles transversales, peatones en cruces peatonales (marcados o no) involucrados en el accidente o que hayan influido en las acciones que ocasionaron el accidente, cambios abruptos de alineación o problemas de iluminación. Para los accidentes a media cuadra, los elementos contribuyentes incluyen accesos a edificios, coches estacionados, objetos fijos y peatones que no cruzan por cruces peatonales legales. Un archivo que incluya los elementos contribuyentes a los accidentes tiene ventajas evidentes para los ingenieros de tránsito.

Un segundo tipo general de archivos utiliza coordenadas. También pueden utilizarse, cuando estén disponibles, sistemas geográficos de información y ubicación de los accidentes por nodos (intersecciones) y segmentos (medias cuadras).

Procesamiento de Datos

Con el uso de computadoras para el procesamiento de datos, se dispone de una serie de metodologías para el procesamiento de datos:

1. Listas periódicas de accidentes por ubicación
2. Listas periódicas de sitios con un alto número de accidentes
3. Datos tabulados detalladamente, relacionados con sitios con un alto número de accidentes para ser usados en la preparación de diagramas de colisión (ver próximas secciones).

4. Sumarios especiales que relacionen la frecuencia ó el índice de accidentes al tipo de vialidad, características geométricas, condiciones de pavimento y condiciones diurnas y nocturnas.

Identificación de Sitios de Alto Riesgo

Se emplean cuatro sistemas generales para la identificación de sitios de alto riesgo.

1. **Método del Número de Accidentes:** Áreas de riesgo son seleccionadas si tienen más de un número determinado de accidentes por unidad de longitud de vía o localizados en una intersección.
2. **Índice de Accidentes:** Las áreas de riesgo son seleccionadas con base en accidentes por 100 MVK (millones de vehículos-kilómetro) para secciones de vía o a accidentes por MVE (millones de vehículos que entran) para intersecciones (en próximos párrafos se detalla el procedimiento para el cálculo de estos índices).
3. **Control de Calidad del Índice:** Este tipo utiliza cálculo estadísticos para determinar la probabilidad de que los índices por 100 MVK o MEV sean significativamente más altos que la media para sitios similares.
4. **Índice/Número:** Este sistema utiliza ambos el número de accidentes y el índice de accidentes. Por ejemplo, en una municipalidad o estado en particular, una intersección es seleccionada para un estudio detallado cuando el número de accidentes excede cuatro por año y la tasa por MVE excede 150. Una sección de vía es seleccionada para un estudio cuando los accidentes por kilómetro por año exceden 1.5 por año y los accidentes por 100 MVK exceden 280 por año.

Los valores de los números y los índices para ser usados en cada uno de estos métodos son particulares de cada localidad, desarrollados generalmente con experiencias locales.

2. ANÁLISIS DETALLADO DE ACCIDENTES

Pasos generales:

1. Obtener copias de los reportes de accidentes (fig 6.1) durante los últimos 2 años.
2. Preparar un diagrama de colisión para mostrar gráficamente detalles importantes para cada accidente.
3. Obtener datos adicionales de tránsito:
 - a) Conteos direccionales en horas pico
 - b) Chequeos de las velocidades en los vehículos si estas son un factor contribuyente a los accidentes
 - c) Observación o estudio de violaciones de tránsito

4. En una intersección no semaforizada con tendencia a colisiones de ángulo recto, hacer un análisis de velocidad en los vehículos.
5. Chequeo de campo del área de estudio. Notar problemas de visibilidad, control, etc.
6. Utilizar los datos para seleccionar la medida mitigante mas apropiada para el área en cuestión.
7. Después de instaladas las mejoras, verificar los efectos con un seguimiento de los accidentes (estudio de antes y después) para evaluar la efectividad de las mejoras.

Preparación de los Diagramas de Colisión

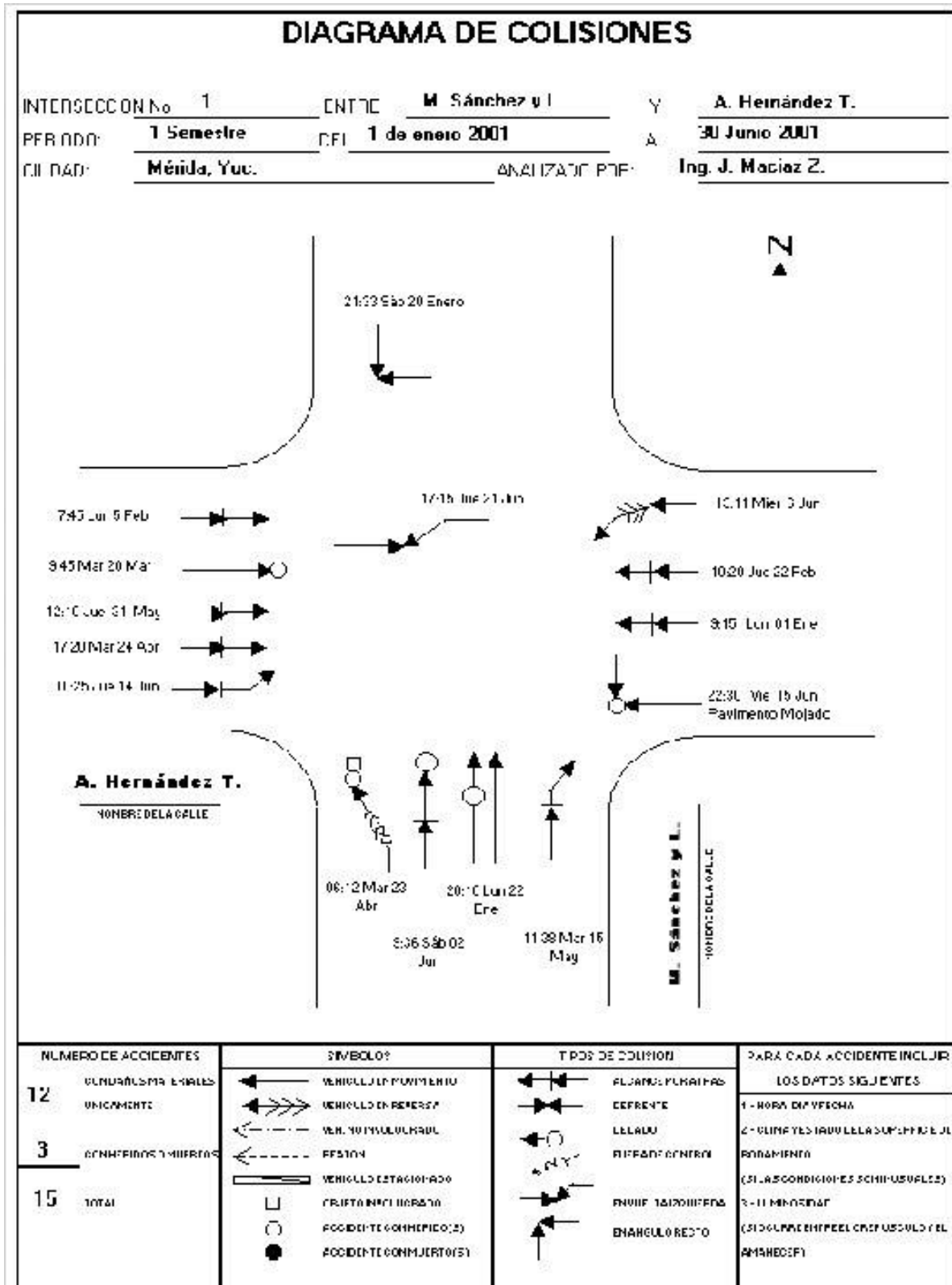
Aún y cuando los diagramas de colisión (fig. 6.2) puedan ser preparados para medias cuadras y segmentos de vialidad, su uso más común es para intersecciones. Los elementos más importantes del diagrama, desde el punto de vista de ingeniería de tránsito, incluyen lo siguiente:

1. Maniobras de los choferes inmediatamente antes del accidente (giros a la izquierda, etc.).
2. Sendero del vehículo inmediatamente antes del accidente.
3. Indicar la existencia de condiciones inusuales (construcción, etc.) y el estado de la vía (húmedo, etc.). Es importante también indicar si el accidente tuvo lugar durante la noche.

En el diagrama, para cada accidente individual, es conveniente mostrar el día de la semana, además de la fecha y la hora del accidente. Todos los accidentes relacionados con la intersección deben mostrarse en el diagrama, independientemente de su verdadera ubicación. El diagrama no se dibuja a escala. Los alcances (colisiones por detrás) que ocurran al final de la cola en una intersección controlada, se incluyen esquemáticamente como si hubieran ocurrido en la intersección.

Es importante incluir en el diagrama, si es posible, los vehículos no involucrados en el accidente que hayan contribuido de alguna forma con la colisión.

Figura 6.2. Diagrama de Colisión



3. CÁLCULO DE LOS ÍNDICES DE ACCIDENTES

Existen tres tipos básicos de comparaciones:

1. Estudios paralelos (entre diferentes sitios o áreas durante el mismo período de tiempo)
2. Estudios de seguimiento (estudios de antes y después, entre diferentes períodos de tiempo en el mismo sitio o área)
3. Estudios condicionales (entre características físicas de la vialidad, indiferentemente de la ubicación y período de tiempo, ocurrencia)

En las comparaciones hechas se deben incorporar medidas de cambios en exposición (índices de accidentes que tomen en cuenta la exposición de vehículos a la ocurrencia de accidentes). El cálculo de los índices de accidentes de manera que se tome en cuenta la exposición de los vehículos a los accidentes, tienen como base uno de los siguientes:

1. Por millones de vehículos que entran (MVE)
2. Por 100 millones de vehículos-kilómetros de viaje (100 MVK)
3. Por 10000 vehículos registrados
4. Por 100000 habitantes.

Las dos primeras bases son las de mayor utilidad para el ingeniero de tránsito. La ecuación estándar para el cálculo de índices de accidentes es:

$$\text{Índice} = (\text{N}^\circ \text{ de accidentes} \times \text{base}) / (\text{exposición})$$

Cálculo de Índices de Accidentes para Intersecciones

A continuación se muestran los cálculos para determinar los índices de accidentes para una intersección:

$$\text{Indice} = \left[\sum_{\text{1 año}} \text{accidentes} \right] \times 10^6 \div [\text{VEID} \times 365]$$

donde,

VEID = volumen que entra a la intersección diariamente (en 24 horas)

Cálculo de Índices de Accidentes para Secciones de Vía

A continuación se muestra la fórmula usada para el cálculo de índices de accidentes para segmentos de vías:

$$\text{Indice} = \left[\sum_{\text{1 año}} \text{accidentes} \right] \times 10^8 \div [\text{TVKV}]$$

donde,

TVKV = total de vehículos-kilómetros de viaje.

TVKV es igual al tránsito promedio diario anual multiplicado por la longitud de la ruta y el número de días en el estudio.

Análisis de la Efectividad de Mejoras en la Seguridad Vial (Estudios de Antes y Después)

Este tipo de estudios es usado en la ingeniería de tránsito no sólo para evaluar mejoras en la seguridad vial, sino también para evaluar medidas operacionales. El uso de este tipo de estudios es apropiado cuando se puede asumir que, de no haber hecho la mejora, las condiciones de la vialidad permanecerían iguales (alta accidentalidad, altas demoras, etc.). Para los efectos de accidentes, este tipo de estudios se basa en los cambios en el número de accidentes ocurridos, el cambio de índices, o el porcentaje de cambio. Para accidentes, el porcentaje de cambio se calcula de la siguiente forma:

$$Cambio = \frac{\sum_{antes} Accidentes - \sum_{después} Accidentes}{\sum_{antes} Accidentes} \times 100$$

Cuando se comparan los resultados de un estudio de "antes y después" es imperativo que se investigue la significancia estadística de los resultados. La significancia estadística de los resultados se puede investigar usando diversos métodos estadísticos.

CAPITULO VII. ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

En estudios de tránsito, después que los datos han sido recolectados en el campo, la información debe ser procesada para ser analizada. La evaluación de los resultados de los estudios debe ser evaluada utilizando el método estadístico apropiado. Tanto los estudios de campo como los análisis estadísticos deben ser llevados a cabo con propiedad, de manera que las condiciones de tránsito prevaletientes sean conocidas.

1. PROCESAMIENTO DE LOS DATOS

Cuando los datos son agrupados sistemáticamente de acuerdo con la frecuencia con que ocurren (como por ejemplo la agrupación de velocidades en un estudio de velocidades instantáneas), la tabulación resultante es una distribución de frecuencias. Si la recolección de información está basada en el tiempo de ocurrencia de los eventos (como el paso de vehículos en un estudio de volúmenes de tránsito), entonces el arreglo de los valores resultantes se define como una serie de tiempo o una distribución basada en tiempo de ocurrencia del evento. Cuando los datos son organizados de acuerdo a la ubicación geográfica (como la ubicación de accidentes en un plano de vialidades), la distribución es llamada distribución espacial. Todas estas distribuciones se usan comúnmente en ingeniería de tránsito.

Distribución de Frecuencias

Desarrollar un cuadro de frecuencias es una manera conveniente de agrupar los datos para los efectos de la ingeniería de tránsito. Para desarrollar el cuadro es necesario seleccionar los grupos o clases. Si se seleccionan demasiados o muy pocos grupos, se pueden perder muchos detalles en la reducción de datos. En general, el número apropiado de clases o grupos varía entre 8 y 20.

Después de que los datos de campo han sido recolectados, la variación total entre las medidas se determina substrayendo el valor mas bajo del valor más alto. Esta variación se divide entre 8 y 20 para estimar los tamaños máximos y mínimos de los grupos respectivamente, de manera que sean razonables para los datos observados.

Después de haber seleccionado el tamaño de los grupos dentro de los límites de los valores mínimos y máximos, los límites de los grupos son seleccionados, de manera que se defina el número de datos muestreados que están contenidos en cada grupo. Los límites de los grupos se escriben con la misma precisión de los datos aforados originalmente. El valor medio es el punto medio del grupo en cuestión.

En el cuadro 7.1 se muestra un ejemplo de un cuadro de frecuencias típico para velocidades instantáneas. Como se observa en el cuadro, después que los límites de las clases o grupos han sido definidos, cada observación del campo se coloca en su grupo apropiado. Sumando el número de entradas de cada clase o grupo, se obtiene la frecuencia de los eventos para cada clasificación en el estudio de tránsito. El cuadro resultante de eventos en los diversos grupos es la distribución de frecuencias.

Cuadro 7.1 Distribución de Frecuencias para Velocidades Instantáneas
(Fuente: Traffic Engineering Studies, Paul Box y J. Oppenlander)

Fronteras Grupos	Límites de Grupos	Valores Medios de Grupos	Frecuencia s de los Grupos	Frecuencias Relativas	Frecuencias Acumuladas	
					Número	Relativa
27,5	28 - 29	28,5	0	0.000	0	0.000
29,5	30 - 31	30,5	1	0.005	1	0.005
31,5	32 - 33	32,5	2	0.011	3	0.016
33,5	34 - 35	34,5	14	0.075	17	0.092
35,5	36 - 37	36,5	7	0.038	24	0.129
37,5	38-39	38,5	20	0.108	44	0.237
39,5	40-41	40,5	38	0.204	82	0.441
41,5	42-43	42,5	29	0.156	111	0.597
43,5	44-45	44,5	35	0.188	146	0.785
45,5	46-47	46,5	15	0.081	161	0.866
47,5	48-49	48,5	12	0.065	173	0.930
49,5	50-51	50,5	9	0.048	182	0.979
51,5	52-53	52,5	4	0.022	186	1.000
53,5	54-55	54,5	0	0.000		
55,5						
Totales			186	1.000		

Nótese, que el 86.6 percentil está aproximadamente en 47.5 kph. Esta es la velocidad que es excedida sólo un 13.4% de las veces. El uso de percentil tiene mucha aplicación en la ingeniería de tránsito.

La distribución de frecuencias relativa se obtiene dividiendo los eventos de cada grupo entre el tamaño de la muestra. Nótese que la sumatoria de las frecuencias relativas debe totalizar 1.0. El uso de frecuencias relativas, expresadas como proporciones o porcentajes, permite la comparación directa de los resultados obtenidos por diversos estudios con diferentes tamaños de muestra.

La distribución de frecuencias acumuladas provee una lista de la frecuencia total de las observaciones que son mayores o menores que un valor específico. Por lo tanto, la

distribución de frecuencias acumuladas se puede obtener indiferentemente comenzando al principio o al final del cuadro de frecuencias. La distribución de frecuencias acumuladas se obtiene directamente de la distribución de frecuencias, como se muestra en el cuadro.

Distribución de Series de Tiempo

Los eventos que son observados y de los cuales se anota el instante exacto de su ocurrencia, son recolectados a lo largo de períodos de tiempo y su tabulación produce distribuciones de series de tiempo. El intervalo de tiempo adecuado para recolectar los datos se selecciona de acuerdo al propósito del estudio y puede variar de segundos a varios años de duración.

Distribuciones Espaciales

Muchas veces la información de tránsito se presenta con referencia a ubicaciones geográficas específicas. Tal es el caso de accidentes sobre segmentos de vía, inventarios de dispositivos para el control de tránsito sobre planos de la ciudad, etc.

2. ESTADÍSTICAS DESCRIPTIVAS

El objetivo de las estadísticas descriptivas es describir un conjunto de datos de un muestreo utilizando pocos valores. En otras palabras, es un sumario que incluye la tendencia central, la variabilidad y la forma de los datos.

Tendencia Central

Existen varias medidas para describir la tendencia central de un conjunto de observaciones. Las mas comúnmente usadas son:

1. Media aritmética
2. Mediana
3. Moda

Por lo general, la media está ubicada cerca del centro de la distribución de los datos en cuestión. La medida de tendencia central más comúnmente utilizada es la media aritmética. La siguiente ecuación ilustra su cálculo:

$$\bar{X} = \frac{\sum X_i}{N}$$

donde,

\bar{X} = media aritmética

$\sum X_i$ = sumatoria de todas las observaciones

N = número de observaciones

Si las medidas han sido colocadas en grupos como en el caso de las distribuciones de frecuencias, entonces la media aritmética se calcula usando la siguiente ecuación:

$$\bar{x} = \frac{\sum (f_i u_i)}{\sum f_i}$$

donde,

$\sum (f_i u_i)$ = suma de los productos de las frecuencias y el valor medio de los grupos para todos los grupos.

$\sum f_i$ = suma de las frecuencias para todas las clases

La mediana representa el valor medio de una serie de medidas que han sido ordenadas en orden de magnitud. Si el número de observaciones es impar, entonces la mediana es el valor del medio en la lista de medidas en orden de tamaño. Sin embargo, la mediana es definida como la media aritmética de los dos valores medios si el número de medidas es par. El valor del 50 percentil es igual a la mediana, esto quiere decir que la mitad de las observaciones se encuentran a cada lado de la media. La mediana es una medida útil porque es menos afectada por los valores extremos que la media aritmética.

La moda define el valor que ocurre con la mayor frecuencia en la distribución de las medidas. No es un valor muy confiable para muestreos pequeños porque varios valores pueden ocurrir aleatoriamente con la misma frecuencia. A medida que el tamaño del muestreo es mayor, los valores de la mediana y de la moda se hacen mas confiables.

Variabilidad

Otro valor estadístico descriptivo es la variabilidad o dispersión de los datos de un muestreo en particular. En sumatorias de datos para ingeniería de tránsito se usan a menudo las siguientes medidas de variabilidad:

1. Rango
2. Desviación estándar

El rango es relativamente fácil de calcular, sin embargo, la desviación estándar es una medida de variabilidad mucho mas confiable. El rango es el intervalo entre la mas pequeña y la mas grande de las observaciones y se calcula de la siguiente forma:

$$R = X_{\max} - X_{\min}$$

donde,

R = rango

X_{\max} = valor máximo de las mediciones

X_{\min} = valor mínimo de las mediciones

El rango depende mucho del tamaño del muestreo y es demasiado sensible a medidas excepcionales o erráticas. El rango no puede ser usado para comparaciones.

La medida de variabilidad mas importante es la desviación estándar, que es la raíz cuadrada de la varianza. Para datos no agrupados (que no están agrupados en función de la frecuencia con que ocurren), la desviación estándar esta dada por:

$$s = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{N - 1}}$$

donde,

s = desviación estándar

\bar{X} = media aritmética

X_i = observación número "i".

N = número de observaciones

La siguiente ecuación para desviación estándar es aplicable cuando la información ha sido procesada en un formato de grupos, y frecuencia de ocurrencia de estos grupos:

$$s = \frac{\sum f_i u_i - \frac{(\sum f_i u_i)^2}{\sum f_i}}{\sum f_i - 1}$$

donde,

s = desviación estándar

u_i = valor medio del grupo "i"

f_i = frecuencia del grupo "i"

Si la forma de los datos se aproxima a la forma de una distribución normal, entonces pueden obtenerse múltiplos de la desviación estándar a cada lado de la media, de manera que representen los límites dentro de los cuales se encuentran varios porcentajes de los valores totales en un muestreo en particular. Por ejemplo, dentro de los límites definidos por una, dos o tres veces la desviación estándar a los lados de la media, se encuentran el 68.3%, 95.5% y el 99.7% de todas las observaciones (ver Cuadro 7.1) definiendo los percentiles.

Inferencia Estadística

Para la interpretación de los resultados de los estudios de ingeniería de tránsito, pueden usarse varias técnicas de inferencia estadística. La inferencia estadística permite la generalización de resultados de un muestreo para describir la población o universo de donde proviene el muestreo. Para el desarrollo de inferencias estadísticas se usan probabilidades. A continuación se presentan algunos métodos usados para inferencias estadísticas. Mas información de la materia se presenta en cualquier texto de estadística.

Valores estadísticos son usados para describir una población entera. Sin embargo, la validez de esta descripción depende de la confiabilidad de los datos y de lo representativos de la población que tratan de describir. Los requerimientos para un muestreo representativo son:.

1. La muestra debe ser seleccionada sin sesgo
2. Los componentes del muestreo deben ser completamente independientes los unos a los otros
3. No deben haber diferencias entre las áreas de donde se recopilan los datos.

4. Las condiciones deben ser las mismas para todos los elementos que constituyen el muestreo.

Confiabilidad del Muestreo

Asumiendo que el muestreo ha sido recopilado sin sesgo alguno, es posible calcular el error debido al azar por medio del cálculo de intervalos. El cálculo del intervalo de la media de una población en particular tiene mucha utilidad para ciertos estudios de ingeniería de tránsito. Los intervalos de la media de una población están dados por la siguiente inecuación:

$$\bar{X} - \frac{t_a s}{\sqrt{N}} < \mathbf{m} < \bar{X} + \frac{t_a s}{\sqrt{N}}$$

donde,

μ = media de la población

\bar{X} = media del muestreo

s = desviación estándar del muestreo

t = estadística de la distribución "t" para (N-1) grados de libertad y la probabilidad definida por α .

N = número de observaciones

La expresión $\left(\frac{s}{\sqrt{N}}\right)$ es el error estándar de la media estimada. Diferentes valores para la distribución "t" pueden ser obtenidos de tablas estadísticas para determinados grados de libertad y para los niveles de α seleccionados. Los términos a los lados de μ en la ecuación anterior, definen los límites del intervalo de confianza. Un coeficiente de confianza del 95 por ciento provee un intervalo de confianza estimado de utilidad para la mayoría de los objetivos de los estudios de tránsito.

Cuando en un estudio los resultados son expresados como una proporción o porcentaje, la precisión de los estimados de estas proporciones se calcula de la siguiente forma:

$$p - t_a \sqrt{\frac{pq}{N}} < P < p + t_a \sqrt{\frac{pq}{N}}$$

donde,

P = proporción de la población

p = proporción del muestreo

q = 1,0 - p

t = estadística de la distribución "t" para (N-1) grados de libertad y la probabilidad definida por α .

N = número de observaciones

El término $\sqrt{\frac{pq}{N}}$ es el error estándar del estimado de la proporción.

Prueba de Significancia

Es importante saber, en estudios de antes y después, si los datos son significativamente diferentes o las diferencias encontradas son debidas a variaciones aleatorias del muestreo. De allí se deriva la importancia de las pruebas de significancia.

Si se toman dos muestreos de la misma población, es muy probable que sus medias aritméticas sean diferentes. Si son de la misma población, las diferencias entre las medias de los muestreos se debe sólo al azar y está sujeta a las leyes de probabilidades. Dependiendo del número de observaciones de los muestreos, las diferencias de las medias de muestreos de la misma población varía. En la medida en que el tamaño de los muestreos sea mayor, las diferencias entre las medias será menor.

Debido a que las diferencias entre medias de una población dada ocurren debido al error aleatorio, estas diferencias están sujetas a las leyes de probabilidades y siguen una curva normal. Cualquier diferencia de una magnitud tal que caiga en un punto extremo de la curva normal, no se debe sólo al error aleatorio y, representa una diferencia de magnitud significativa.

La prueba de significancia para comparar medias de dos poblaciones con varianzas diferentes se basa en muestreos con un número de observaciones mayor o igual a 30. El test estadístico para la comparación está dado por la ecuación siguiente:

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{N_1} + \frac{s_2^2}{N_2}}}$$

donde,

t = estadística de la distribución "t".

\bar{X}_1 = media del primer muestreo

\bar{X}_2 = media del segundo muestreo

s_1 = desviación estándar del primer muestreo

s_2 = desviación estándar del segundo muestreo

N_1 = número de observaciones en el primer muestreo

N_2 = número de observaciones en el segundo muestreo

El valor calculado de "t" se compara con el valor crítico " t_c " (en las tablas de valores para la distribución "t", para un determinado nivel de confianza e infinitos grados de libertad) para determinar la significancia de la diferencia entre las medias de dos muestreos. El valor de " t_c " se selecciona de acuerdo a un nivel específico de significancia (α). Un valor de 0.05 se escoge a menudo para el nivel de significancia. Sin embargo, valores de α entre 0.01 y 0.10 están dentro del rango apropiado para la mayoría de las evaluaciones de datos de tránsito.

Si el valor absoluto del valor calculado de "t" es mayor que t_c , entonces la diferencia entre las dos medias es considerada significativa.

La prueba de significancia para la diferencia entre dos proporciones o porcentajes esta dado por la siguiente ecuación:

$$t = \frac{p_1 - p_2}{\sqrt{p_0 q_0 \left(\frac{1}{N_1} + \frac{1}{N_2} \right)}}$$

donde,

t = estadística de la distribución "t".

$$p_o = \frac{p_1 N_1 - p_2 N_2}{N_1 + N_2}$$

p₁ = proporción observada en el primer muestreo

p₂ = proporción observada en el segundo muestreo

N₁ = número de observaciones en el primer muestreo

N₂ = número de observaciones en el segundo muestreo

q₀ = 1.0 - p₀

3. DISTRIBUCIONES DE POISSON

La distribución de llegadas de vehículos a una intersección aislada (que no esté bajo la influencia de otras intersecciones semaforizadas) está regida por una distribución de Poisson. La distribución de Poisson tiene una gran cantidad de aplicaciones en ingeniería de tránsito y vialidad. Este tipo de distribución estadística describe la ocurrencia aleatoria de ciertos eventos discretos, como por ejemplo la llegada aleatoria de vehículos a un punto sobre la vía y la ocurrencia de accidentes en ciertas localidades.

La función de distribución de frecuencias esta dada por la siguiente ecuación:

$$P(x) = \frac{m^x e^{-m}}{x!} \quad (I)$$

donde, P(x) = probabilidad de "x" ocurrencias de un evento en particular durante un periodo de tiempo dado.

x = número de ocurrencias durante un período de tiempo dado.

m = número medio de ocurrencias en un período de tiempo dado.

La función de la distribución de frecuencias acumuladas está dada por la ecuación siguiente:

$$P(x \leq n) = \sum_{x=0}^n \frac{m^x e^{-m}}{x!} = \sum_{x=0}^n P(x) \quad (II)$$

El uso de esta ecuación se ilustra con el siguiente ejemplo:

- (a) El volumen de tránsito en el afluente de una intersección semaforizada aislada es de 120 vph/carril. Determinar la longitud de la fase verde requerida para asegurar que todos los vehículos logren pasar la intersección el 95% de los ciclos si el ciclo es de 60 seg. Asumir que las llegadas de vehículos a la intersección son Poisson.

$$m = 120 \text{ vph}/60 \text{ ciclos por hora} = 2 \text{ vehículos/ciclo}$$

Utilizando las ecuaciones (I) y (II) obtenemos que:

$$P(x \leq n) = \sum P(x)$$

P(0) = 0.135	0.135
P(1) = 0.270	0.405
P(2) = 0.270	0.675
P(3) = 0.180	0.855
P(4) = 0.090	0.945

Diseñar el tiempo de la fase verde para que pasen 4 vehículos.

Asumiendo un intervalo de saturación de 2 seg. y un tiempo perdido al inicio de la fase de 3 seg.:

$$\text{verd.} = 3 + 2(4) = \underline{11 \text{ seg.}}$$

Aún y cuando la mayoría de las veces las llegadas de vehículos a un punto de la vía están regidas por una distribución de Poisson, a veces es necesario comprobar lo adecuado de esta suposición. El método estadístico para comprobar lo adecuado de la suposición anterior está basado en la distribución de Chi Cuadrada (χ^2). El uso de esta metodología se ilustra a continuación con un ejemplo. Para mas información sobre esta metodología, referirse a cualquier texto de estadística.

Ejemplo:

Considérense los datos de volúmenes por un (1) minuto que se ilustran en el siguiente cuadro para una carretera rural, presentados en la segunda columna. Es necesario comprobar si la distribución de Poisson puede ser usada para aproximar el comportamiento de estas llegadas por un minuto.

Número de llegadas (vpm)	Frecuencia (f) Observada (O)	Probabilidad de Poisson	Frecuencia Esperada (E)	(Frecuencia Observada) - (Frecuencia Esperada) O-E	(O-E) ² /E
0	0	0.0005	0.06		
1	0	0.0036	0.44		
2	2	0.0139	1.68		
3	10	0.0355	4.30		
4	10	0.0680	8.23		
5	17	0.1040	12.59		
6	18	0.1325	16.03		
7	10	0.1450	17.55		
8	13	0.1388	16.80		
9	9	0.1179	14.25		
10	8	0.0901	10.90		
11	10	0.0627	7.59		
12	3	0.0399	4.83		
13	2	0.0234	2.83		
14	0	0.0128	1.55		
15	3	0.0065	0.79		
16	1	0.0031	0.38		
17	2	0.0014	0.17		
18	2	0.0006	0.07		
19	0	0.0002	0.02		
20	0	0.0002	0.02		
21	1	0.0001	0.01		
22	0	0	0		
					Σ = 18.25

* Los valores esperados se combinan de manera que excedan 5

$$\sum f x_i = 926$$

$$\sum f = 121$$

$$m = (926)/121 = 7.65 \text{ vehículos por minuto}$$

Grados de libertad (gl): se pierde un grado de libertad para cada parámetro usado en la ecuación teórica y uno por el muestreo, por lo tanto:

$$gl = 10 - 1 - 1 = 8$$

$\chi^2 = 18.25$; de la tabla de distribuciones Chi cuadrado (ver cualquier libro de estadísticas),

$\chi^2_{.05; 8} = 15.51$, que es menor que el valor calculado. Por lo tanto, existe una diferencia y Poisson no debería ser usada para aproximar esta situación.

4. DISTRIBUCION EXPONENCIAL NEGATIVA

Esta distribución es una forma diferente de expresar la probabilidad de Poisson. La función de distribución de frecuencias esta dada por la siguiente ecuación:

$$f(t) = qe^{-qt}$$

$$m = qT$$

donde, m = número medio de llegadas en un intervalo de tiempo (T)
 q = tasa de flujo

La aplicación de este tipo de distribución se ilustra con el siguiente ejemplo:

Ejemplo:

El volumen de tránsito en una calle está regido por una distribución Poisson. Si la tasa de flujo de tránsito es 150 vph, ¿cual es la probabilidad que el intervalo de tiempo entre dos vehículos sea menor de 5 segundos?

La probabilidad de que un intervalo de tiempo entre dos vehículos, t , sea menor que un valor T está dada por la ecuación siguiente:

$$P(t < T) = 1 - e^{-qT}$$

donde, $T = 5$ seg.
 $q = (150/3600)$ vehículos por segundo.

por lo tanto, $P(t < 5 \text{ seg.}) = 1 - e^{-(150)(5)/3600} = 0.19$; $P(t > 5 \text{ seg.}) = 0.81$

CAPITULO VIII. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL TRANSITO

1. CAPACIDAD Y NIVELES DE SERVICIO

Estos conceptos se aplican a los sistemas de transporte para análisis, tanto de diseño como de operación. Para los especialistas en transporte urbano, los sistemas en cuestión son: autopistas urbanas, vías urbanas (arterias y calles), intersecciones Semaforizadas o no, infraestructura para autobuses y transporte público, infraestructuras peatonales y para ciclistas.

La capacidad depende de las unidades en cuestión (peatones, vehículos particulares, transporte público, etc.), el periodo de tiempo, y el área de la infraestructura en cuestión (carriles, ancho de la calzada, etc.).

El nivel de servicio es un intento en describir las condiciones operacionales del volumen del tránsito tal y como las percibe el usuario. Originalmente, el concepto de nivel de servicio era definido como una manera cualitativa de medir las condiciones operacionales de una vialidad. Esta medida cubriría idealmente factores como velocidad, tiempos de viaje, demoras, libertad de maniobras, interrupciones del tránsito, comodidad y conveniencia y, seguridad. Para los especialistas de transporte, las medidas cuantitativas de estos factores son los de importancia; sin embargo, el concepto de los niveles de servicio es de utilidad para la comunicación con el público en general.

Para cada tipo de infraestructura se definen seis categorías de niveles de servicio, del "A" al "F". El nivel de servicio "A" se refiere a condiciones de volumen libre. El nivel de servicio "E" se refiere a condiciones de volumen a capacidad y el nivel de servicio "F" a condiciones de congestión crítica.

En ingeniería de tránsito existen dos tipos definidos de infraestructura: vías de flujo continuo y de flujo discontinuo. Las definiciones de cada una se dan a continuación.

Flujo Continuo

Las vías de flujo continuos no tienen elementos fijos que sean obstáculo al volumen de tránsito y que provoquen interrupciones, tales como semáforos, altos, etc.

Vías de Flujo Continuo

Los siguientes son ejemplos de vías de volumen continuo:

- Autopistas
 - Tramos Básicos de Autopistas
 - Áreas de Entrecruzamiento
 - Enlaces
 - Sistemas de Autopistas
- Carreteras de Carriles Múltiples
- Carreteras de Dos Carriles

Flujo Discontinuo

Las vías de flujo discontinuo tienen elementos fijos que provocan la interrupción del tráfico de manera periódica. Estos elementos son: semáforos, señales de alto, y otros tipos de control. Estos mecanismos producen paradas del tránsito, indiferentemente de la cantidad de vehículos que existe.

Infraestructura de Flujo Discontinuo

Las siguientes son ejemplos de infraestructura de flujo discontinuo:

- Intersecciones Semaforizadas
- Intersecciones no Semaforizadas (controladas por señales de alto y ceda el paso)
- Arterias
- Transporte Público
- Peatones
- Bicicletas

En el cuadro 8.1 que se muestra a continuación se indican los parámetros técnicos para determinar la calidad de operación de cada una de los tipos de vías.

Cuadro 8.1 Parámetros Técnicos para la determinación del Nivel de Servicio

Tipo de Vía	Parámetros Técnicos
Autopistas	
Tramos Básicos	Densidad (veh/km/carril)
Áreas de Entrecruzamiento	Velocidad de viaje promedio (kph)
Enlaces	Tasas de Volumen (vph)
Carreteras de varios carriles	Densidad (veh/km/carril)
Carreteras de carriles múltiples	Porcentaje de Demoras (%), Velocidad de viaje promedio (kph)
Intersecciones Semaforizadas	Demora promedio individual (tiempo parado, seg./veh.)
Intersecciones no semaforizadas	Capacidad de Reserva (vph)
Arterias	Velocidad de viaje promedio (kph)
Transporte Público	Factor de Carga (personas/asiento)
Peatones	Espacio (m ² /peatón)

DEFINICIONES

Las siguientes definiciones son comúnmente usadas en Ingeniería de Tránsito:

Volumen: Cantidad de vehículos que pasa sobre una sección de vía durante un periodo de tiempo.

VDPA: Volumen diario promedio anual

$$VDPA = (\text{Volumen Anual Total})/365$$

Características Generales del Tránsito

VDP: Volumen diario promedio

$$\text{VDP} = \text{Volumen Total en "N" días} / N$$

Volumen en Hora de Máxima Demanda: Es el cantidad de vehículos que pasa sobre una sección de vía durante 60 minutos consecutivos.

VHDD: Volumen Horario Direccional de Diseño

$$\text{VHDD} = \text{VDPA} \times K \times D$$

donde, $K = \% \text{ de VDPA en la hora de máxima demanda}$
 $D = \% \text{ de volumen en la hora de máxima demanda en la dirección mas marcada.}$

Tasa de Flujo: Expresión horaria del de la cantidad de vehículos que pasa por una sección de vía por un periodo menor a una hora

El cuadro 8.2 que se muestra a continuación ilustra la diferencia entre volúmenes aforados y tasa de volumen.

Cuadro 8.2 Volúmenes Observados y Tasa de Volumen

Tiempo	Conteo	Tasa de Volumen (vph)
5:00 - 5:15	250	1000
5:15 - 5:30	300	1200
5:30 - 5:45	275	1100
5:45 - 6:00	250	1000
Volumen Horario	1075 vph	

Factor de la Hora de Máxima Demanda: relación del volumen de la hora de máxima demanda a la tasa de volumen máxima dentro de la hora pico

$$\text{FHMD} = (\text{Volumen en la Hora de Máxima Demanda}) / (4 \times \text{Vol. Max. 15 min.})$$

Rango $0.25 \leq \text{FHP} \leq 1.0$

Velocidad: Tasa de movimiento del tránsito

Velocidad de Punto: Velocidad a la cual un vehículo pasa un punto en la vía.

Velocidad de Marcha: Distancia total recorrida dividida por el tiempo requerido en recorrerla.

Velocidad de Marcha Promedio: Distancia total recorrida por todos los vehículos en el volumen de tránsito, dividida por el tiempo de viaje total para todos los vehículos.

Velocidad de Proyecto: Es la velocidad máxima (segura) que se puede mantener sobre un tramo específico de vía cuando las condiciones son lo suficientemente favorables para que las características de diseño de la vía gobiernen la operación del vehículo.

Densidad: Cantidad de vehículos ocupando un tramo de vía en un instante dado (VPK)

Capacidad de Vías Rápidas Máxima tasa de volumen sostenida por 15 minutos a la cual el tránsito circula por una sección determinada en una dirección, con condiciones prevalecientes.

Condiciones Prevalecientes: Son las condiciones en las cuales se encuentra la arteria, afectando el volumen de vehículos.

Condiciones de la Vía - Geometría que afecta la capacidad

- Cantidad y ancho de los carriles de circulación
- Obstrucciones laterales
- Velocidades de proyecto
- Pendientes
- Configuración de carriles de circulación

Condiciones de Tránsito - Características de tránsito que afectan la capacidad.

- Composición de tránsito
- Distribución de carriles de circulación
- Características de los conductores

Condiciones Ideales Son las condiciones ideales (con las cuales la capacidad de la vía es máxima) para el volumen de vehículos:

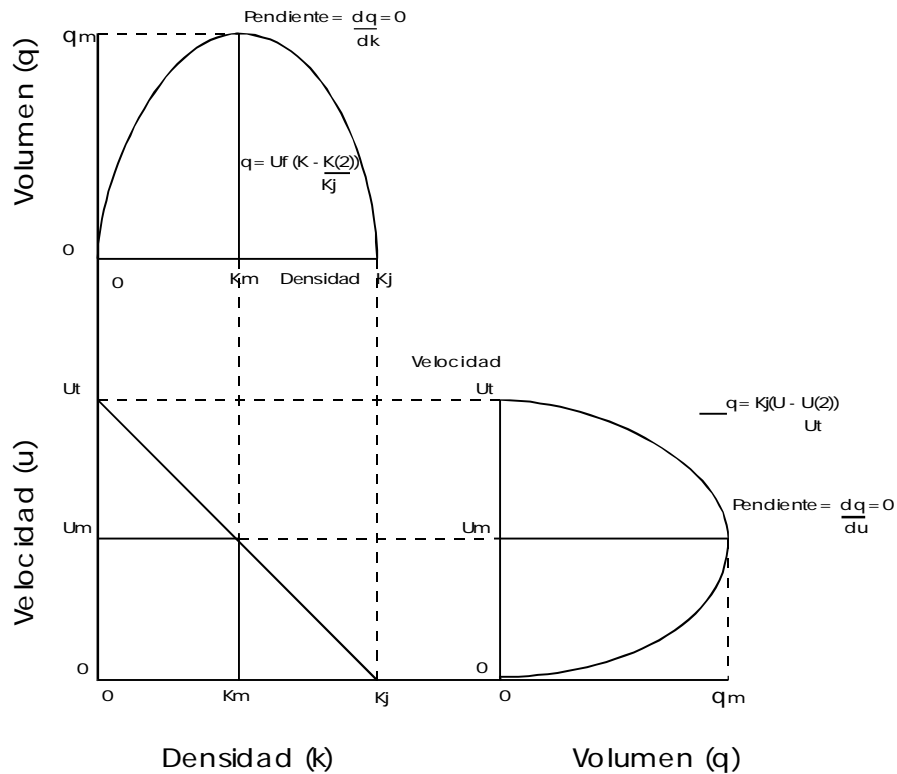
- Carriles de circulación de ancho de 3.65 m.
- Con acotamientos adecuados y sin obstáculos laterales en 2.00 m a partir de la orilla de la calzada.
- Vehículos ligeros únicamente en la corriente del tránsito
- Usuarios regulares
- Pendientes 0%

2. VÍAS DE FLUJO CONTINUO

La definición de este tipo de vías se dio anteriormente. En esta sección se discuten las condiciones matemáticas que describen el volumen de tránsito en este tipo de infraestructura vial.

En la figura 8.1 se ilustra la relación entre volumen, velocidad y densidad. A medida que el volumen crece, la velocidad tiende a decrecer y la densidad se incrementa. En el punto donde se alcanza la capacidad, la tasa de volumen es máxima. Si las condiciones de operación comienzan a deteriorarse (congestión) con frecuentes paradas (volumen forzado), tanto la velocidad como el volumen comienzan a reducirse, mientras la densidad continua aumentando. Los puntos donde ocurre la congestión en la figura, se denominan *velocidad crítica*, *densidad crítica* o *punto de capacidad*.

Figura 8.1. Condiciones de densidad, velocidad y volumen.



Condiciones de Velocidad - Volumen - Densidad

Tal y como se definió anteriormente, la densidad es la cantidad de vehículos que ocupan una longitud de vía específica en un espacio de tiempo determinado. Se expresa en términos de vehículos por kilómetro (veh/km) e influye en la habilidad que tiene el conductor para maniobrar y cambiar de carriles de circulación. La relación matemática esta dada por:

$$q = u \times k$$

donde,

- q = tasa de volumen en vehículos por hora, vph
- u = velocidad promedio, en kph
- k = densidad en veh/km

Velocidad - Densidad (Modelo Lineal)

La relación entre la velocidad y la densidad esta dada por la siguiente ecuación:

$$u = u_f \left(1 - k / k_j \right)$$

donde,

u = velocidad promedio, en kph

u_f = velocidad de volumen libre, en kph

k = densidad, en veh/km

k_j = densidad máxima, completamente congestión, en veh/km.

Nótese en la ecuación de la recta que a medida que aumenta la densidad, la velocidad decrece.

Volumen - Densidad

La relación entre volumen de tránsito y densidad esta dada por la siguiente ecuación:

$$q = u_f (k - k^2 / k_j)$$

donde,

q = tasa de volumen, en vph.

Nótese que la relación corresponde a la ecuación de una parábola, que alcanza un máximo cuando $k = k_m$, que es la densidad crítica, y luego, a medida que la densidad aumenta, el volumen disminuye.

La densidad crítica, k_m , esta dada por la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} dq/dk &= u_f (1 - 2k / k_j) = 0 \\ k_m &= k_j / 2 \end{aligned}$$

Volumen - Velocidad

La relación entre volumen y velocidad esta dada por:

$$q = k_j (u - u^2 / u_f)$$

Al igual que la ecuación que relaciona a la densidad con el volumen, esta también corresponde a una parábola que alcanza el volumen máximo (q_m , capacidad) cuando la velocidad es igual a u_m (velocidad crítica).

La velocidad crítica, u_m , esta dada por la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} dq/du &= k_j (1 - 2u/u_f) = 0 \\ u_m &= u_f / 2 \end{aligned}$$

La capacidad o volumen máximo, q_m , esta dada por la siguiente relación:

$$q_m = u_m \times k_m$$

$$q_m = (u_f \times k_j) / 4$$

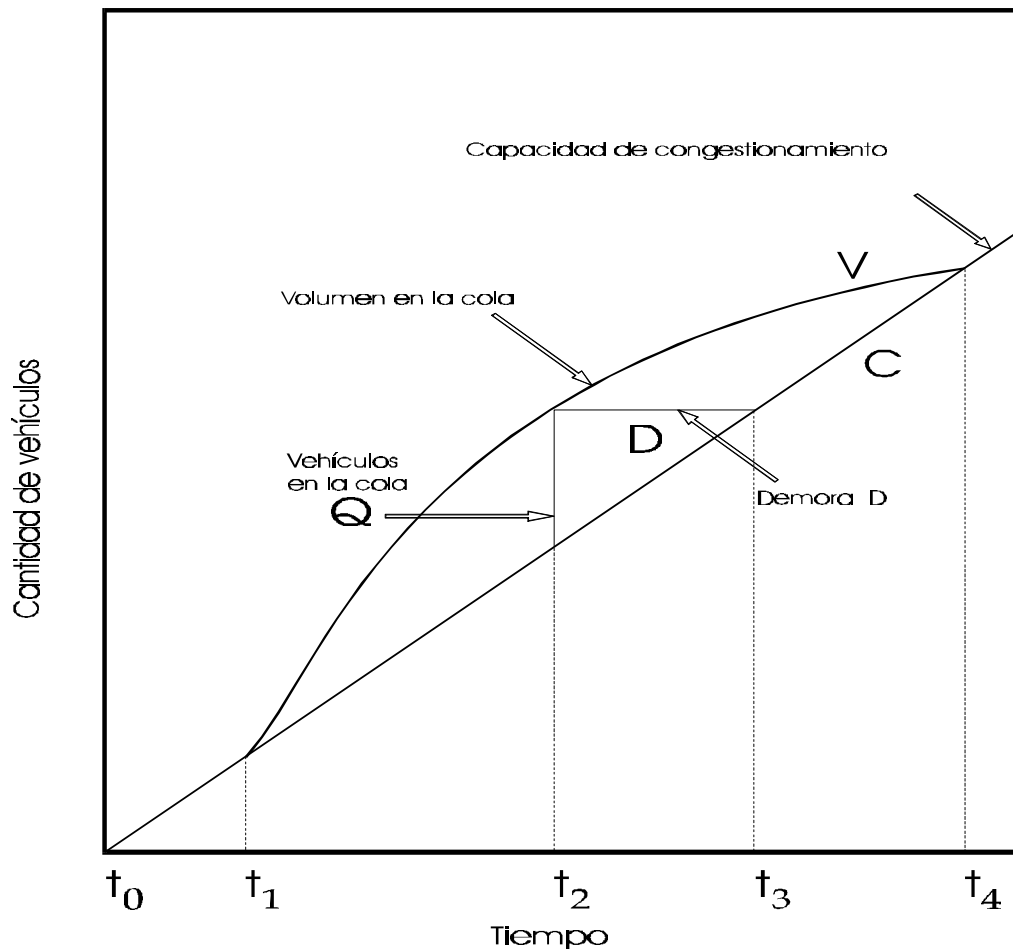
3. CONDICIONES DE CONGESTIÓN

La congestión se produce como el resultado de la demanda de tránsito excediendo la capacidad de la vía. La congestión puede deberse a excesiva demanda o a reducción de la capacidad de la vía.

La Figura 8.2 ilustra un caso de congestión. En ella se representa a la cantidad de vehículos que pasan por un punto de una vía como una función del tiempo. La pendiente de la línea recta representa la capacidad de la sección de autopista en un determinado momento.

Mientras la demanda de tránsito sea menor o igual a la capacidad hay poca congestión. Sin embargo, cuando la tasa de llegadas comienza a exceder a la capacidad en el instante t_1 , se forma un "congestionamiento" y los vehículos comienzan a acumularse formando una cola a partir del punto en que se produce la restricción hasta el instante t_2 que es cuando la demanda se convierte en mayor a la capacidad. Las condiciones de congestión continúan hasta el instante t_4 , que es cuando el tránsito acumulado en el congestionamiento se disipa. El área entre las curvas de capacidad y demanda de tránsito durante condiciones de congestión es la demora total que resulta del congestionamiento.

Figura 8.2. Relación entre Demanda de Tránsito, Capacidad y Congestión.



Análisis de Entradas y Salidas al Sistema

Demoras Totales, D (veh-hr): Área entre las curvas de demanda y capacidad

Demoras Promedio, D (horas):

$$D = D / \text{Total de Vehículos}$$

Longitud Promedio de la Cola, Q (vehículos):

$$Q = D / \text{Periodo de Congestión}$$

Lo discutido anteriormente se ilustra con el ejemplo que a continuación se muestra. En el cuadro 8.3 se indica la demanda y la capacidad de la condición de congestionamiento. Los datos se gráfica en la figura 8.3.

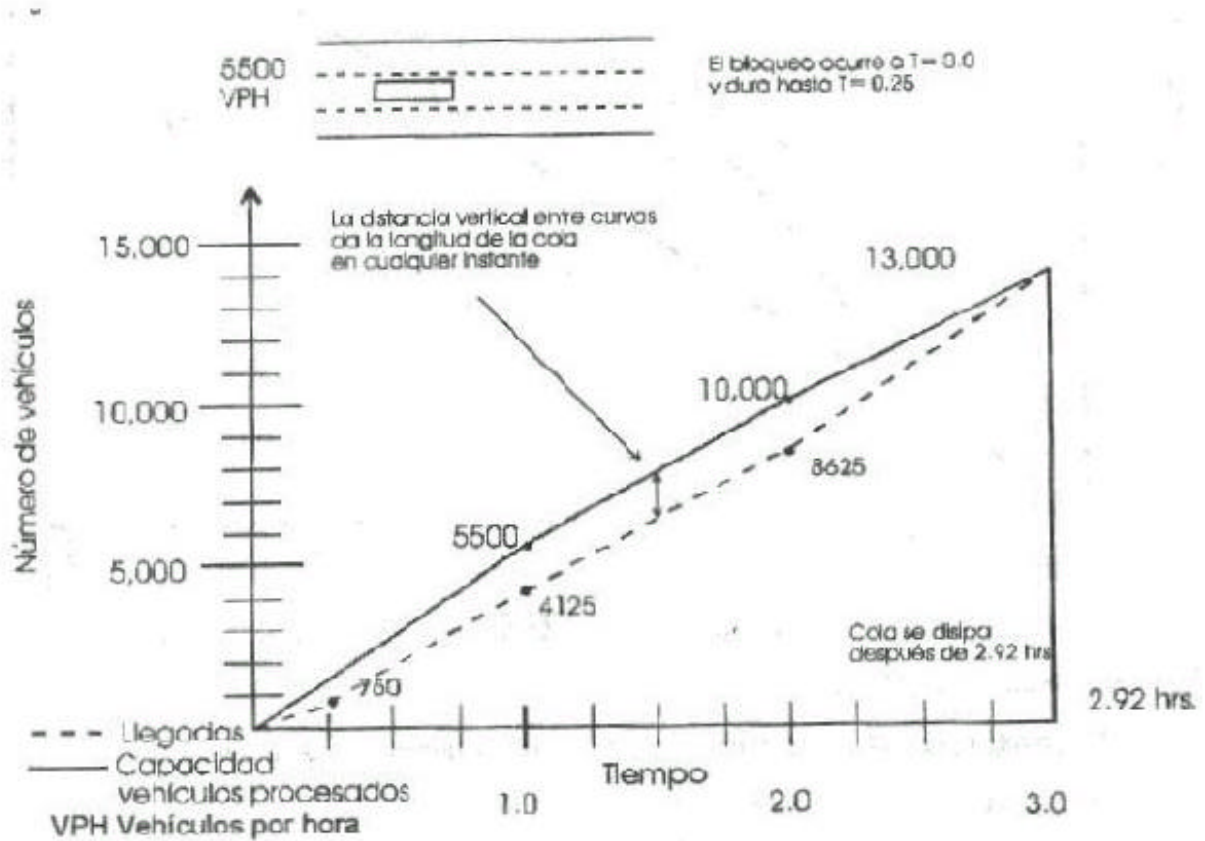
Cuadro 8.3 Demanda y la Capacidad de la Condición de Congestionamiento

Tiempo (t)	Δt	Tasa de Volumen					
		V	C	V	C	Q	D
0	-	5500	3000	-	-	-	-
0.25	0.25	5500	4500	1375	750	625	78.1
1.00	0.75	4500	4500	5500	4125	1375	750
2.00	1.00	3000	4500	10000	8625	1375	1375
2.92	0.92	-	-	12750	12750	0	632.5

$$D = 2835.6 / 12750 = 0.22 \text{ horas}$$

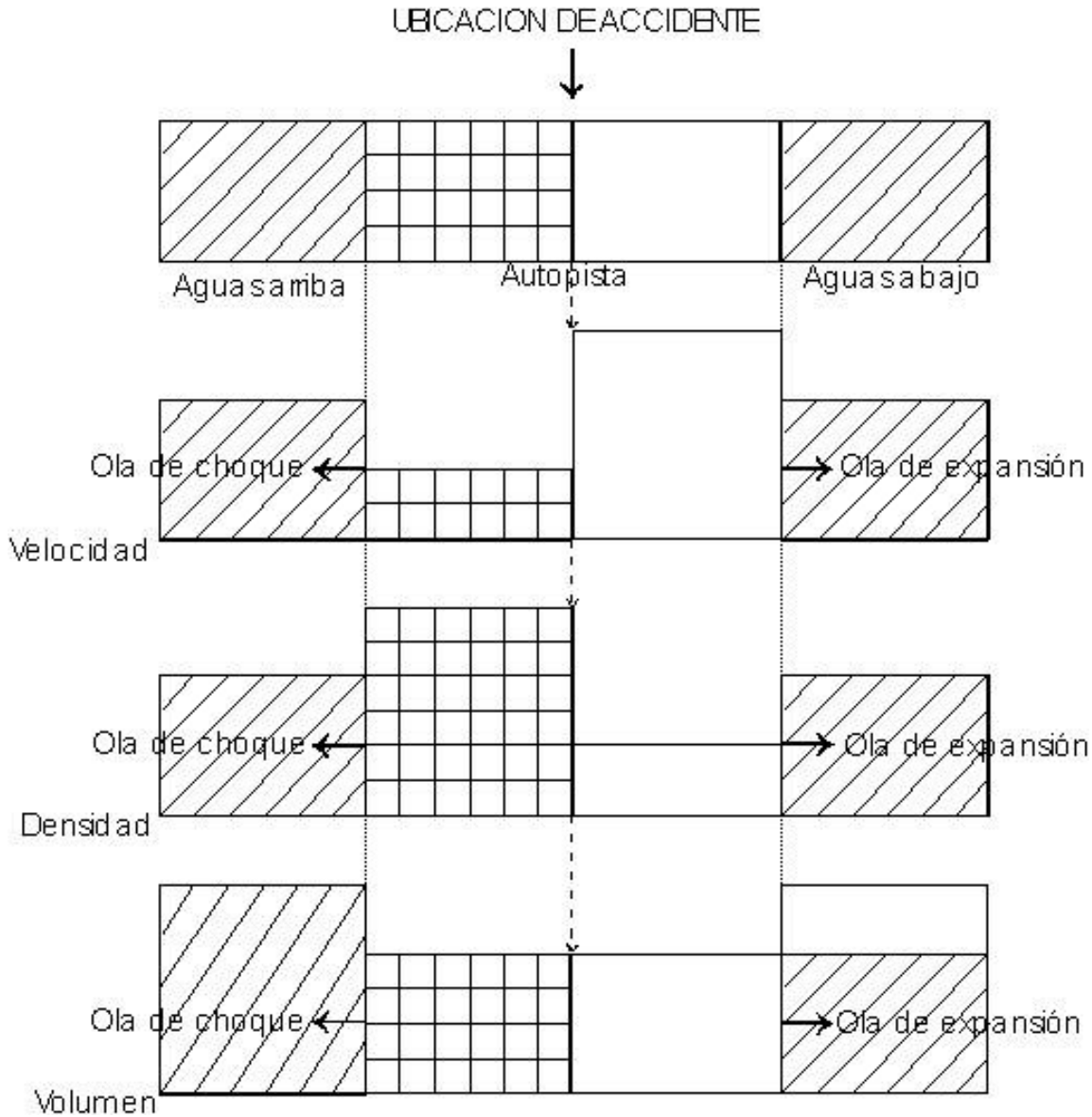
$$Q = 2835.6 / 2.92 = 971 \text{ vehículos}$$

Figura 8.3. Análisis de entradas y salidas, ejemplo numérico.



El comportamiento del tránsito en una autopista con un segmento donde se produzca congestionamiento se ilustra en la figura 8.4. El fenómeno se conoce como olas de choque. En la figura 8.4 se describe el efecto del congestionamiento sobre la velocidad, la densidad y el volumen. Como se indica en la figura, inmediatamente antes del congestionamiento la velocidad disminuye, la densidad aumenta y el volumen disminuye. Inmediatamente después del congestionamiento se produce el fenómeno de ola de expansión: la velocidad es mas alta de lo normal, la densidad mas baja, mientras la tasa de Volumen es la misma del congestionamiento. Después de un lapso de tiempo, las condiciones de velocidad, densidad y volumen vuelven a la normalidad.

Figura 8.4. Comportamiento del Tránsito en un Congestionamiento.



A continuación se muestra en el ejemplo el uso de las relaciones matemáticas del volumen de tránsito en la descripción de un congestionamiento.

Ejemplo

Cálculo de olas de choque con respecto a la curva volumen-densidad (ver figura 8.5). El punto D representa las características de un grupo de vehículos que siguen a un camión muy lento (7.2 kph) y donde no se permite cambios de carriles. Las condiciones de tránsito en el punto B son de volumen libre. la línea limite (ola de choque) entre el volumen libre (B) y el volumen congestionado (D) se mueve a una velocidad de 4.8 kph (velocidad de crecimiento de la cola).

Características Generales del Tránsito

Si el camión sale del sistema, las características de volumen en el punto C prevalecen y la ola de choque entre el volumen en congestión (D) y el volumen máximo (C) se movería a una velocidad de 16.8 kph.

Olas de Choque

u_a = velocidad en la región A

u_b = velocidad en la región B

u_o = velocidad de la Ola

$$u_o = (q_b - q_a) / (k_b - k_a)$$

$$u_b = 1800 / 50 = 36 \text{ kph}$$

$$u_d = 1224 / 170 = 7.2 \text{ kph}$$

$$u_o = -4.8 \text{ kph}$$

Tasa de Crecimiento de la Columna = $u_d - u_o = 7.2 - (-4.8) = 12 \text{ kph}$

Longitud de la cola en 15 minutos = $12 \times 0.25 = 3 \text{ km}$

No. de vehículos en la cola = $(3)(k_d) = (3)(170) = 510 \text{ veh.}$

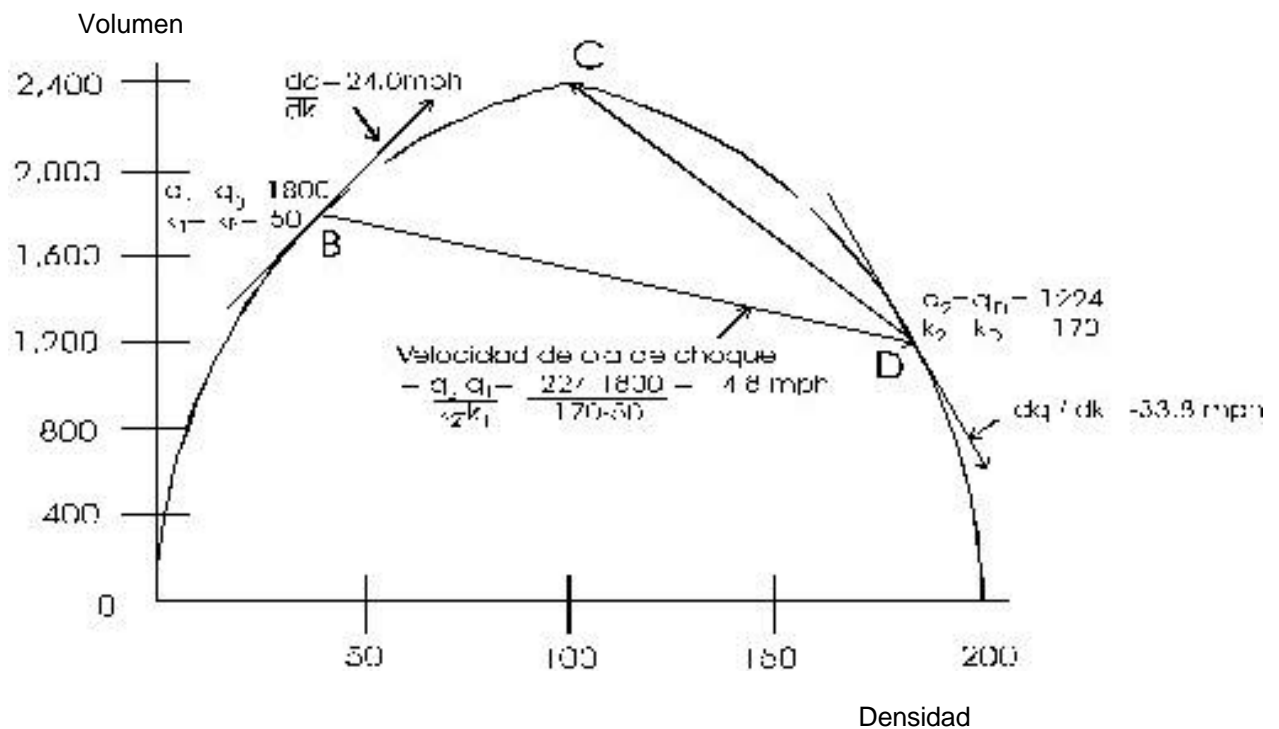
Cuando la longitud de cola se disipa, las características de volumen en el punto C prevalecen:

Parte de atrás de la cola se mueve a -4.8 kph

Parte de adelante de la cola se mueve a -16.8 kph

La cola de 3 km se disipara en $3 / (-4.8 - (-16.8)) = 0.25 \text{ horas}$

Figura 8.5. Curva Volumen - Densidad de un Congestionamiento.

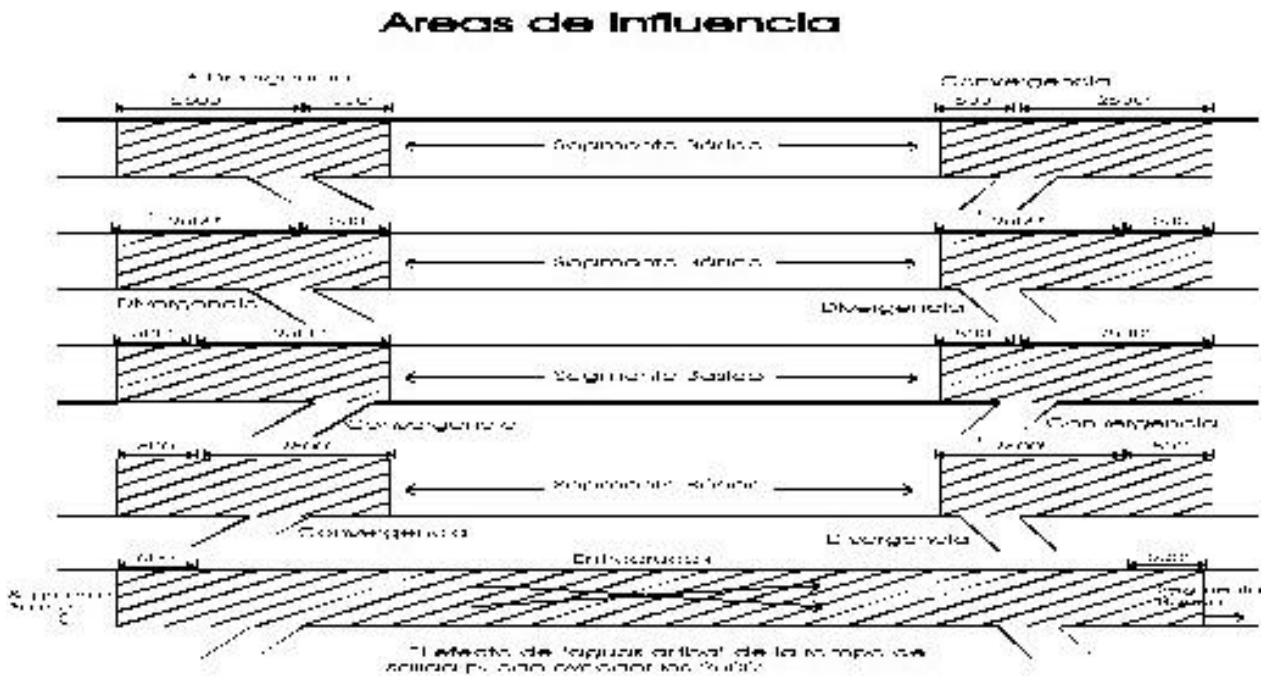


4. INTRODUCCIÓN A VÍAS RAPIDAS

Los análisis de capacidad de autopistas se realizan por lo general para cada uno de sus componentes: segmentos básicos, áreas de entrecruce y rampas. Para rampas de entrada, la influencia de la maniobra de incorporación es aproximadamente de 200 m antes a 800 m después del punto de intersección autopista-rampa. Para las enlace de salida, la influencia de la maniobra de desincorporación es de aproximadamente 800 m antes y a 200 m. después del citado punto de inflexión. Para las áreas de entrecruzamiento, la influencia es de aproximadamente 200 m a cada lado del área crítica.

Las áreas de influencia para cada uno de los componentes de una autopista se ilustran en la Figura 8.6.

Figura 8.6. Áreas de Influencia de los Componentes de una Autopista



Condiciones Básicas

Las condiciones básicas que se muestran a continuación están basadas en la suposición de buenas condiciones de pavimento, sin accidentes, buen clima, colas en los eventos de congestión.

Tasa de Volumen de Servicio Máximo

$$FSM_i = c_j \times (v/c)_{i,j}$$

donde,

- c_j = capacidad ideal de la sección de vía expresa con la velocidad de diseño "j".
- $(v/c)_{i,j}$ = relación de volumen capacidad máxima asociada con LOS "i" para la velocidad de diseño "j".

Tasa de volumen de Servicio

$$FS_i = FSM_i \times N \times f_A \times f_{vp} \times f_p$$

$$FS_i = c_j \times (v/c)_{ij} \times N \times f_A \times f_{vp} \times f_p$$

donde,

N = número de carriles en una dirección

f_A = factor de ajuste del ancho del carril

f_{vp} = factor de ajuste de vehículos pesados

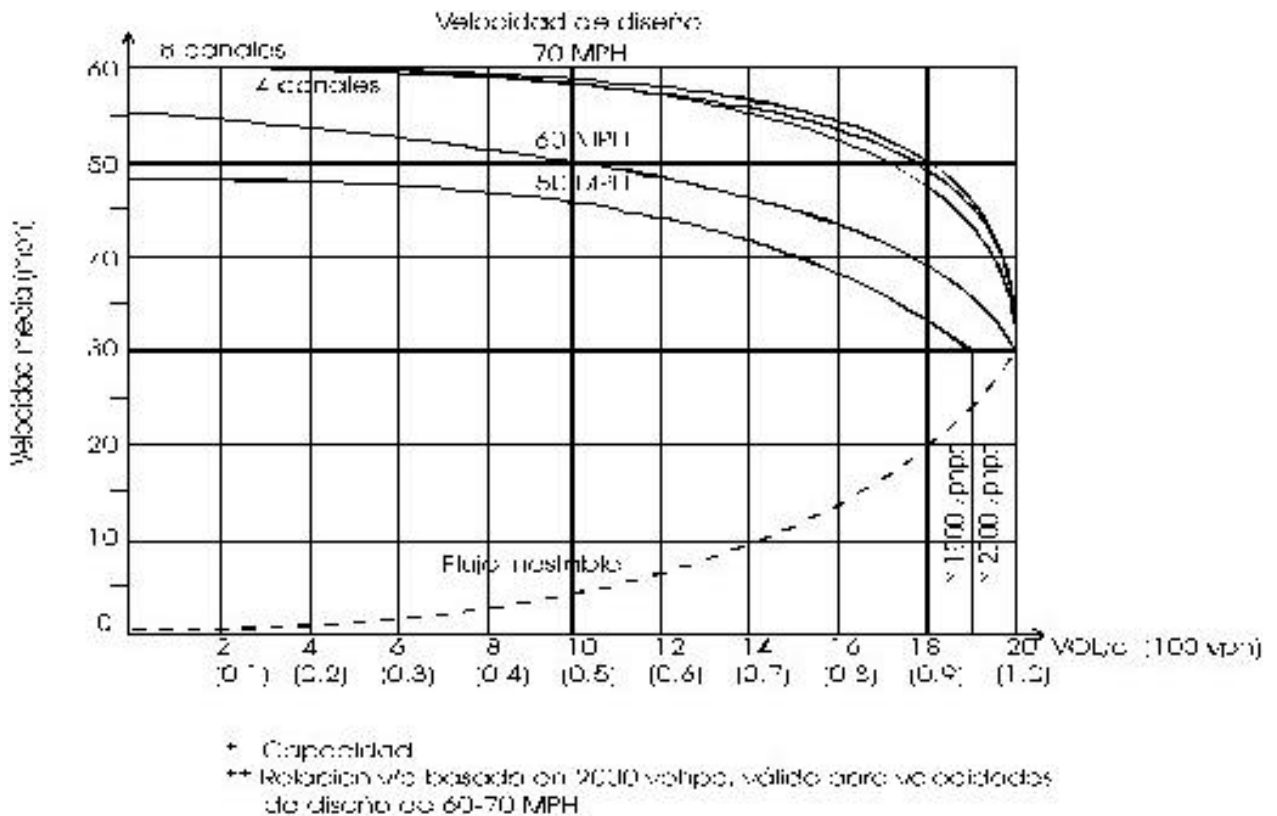
f_p = factor de ajuste de la población de conductores

Componentes de Vías Rápidas

Tramos Básicos

Los niveles de servicio para secciones básicas de autopista están basados en la densidad de tránsito. La Figura 8.7 muestra la relación velocidad/Volumen en condiciones ideales para los segmentos básicos. Nótese que para la mayoría de las autopistas se considera que la capacidad es de 2,000 vphpc (vehículos/hora/carril).

Figura 8.7. Relación velocidad/Volumen de segmentos básicos. Condiciones ideales.

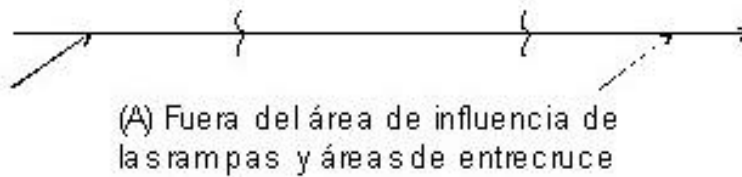


Áreas de Entrecruzamiento

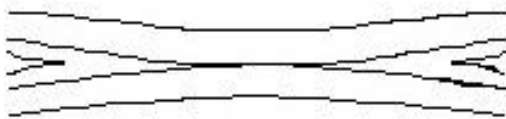
Una área de entrecruzamiento se define como el cruce de dos o mas volúmenes de tránsito que viajan en la misma dirección general. En la Figura 8.8 se ilustran algunos tipos de estos cruces.

Figura 8.8 Segmentos Básicos y Areas de Entrecruce

Segmento básico



Area de entrecruce



(B) Area de convergencia seguida de área de divergencia



(C) Rampas de entrada y salida con canal auxiliar

Rampas

Rampa de entrada aislada



Rampa de entrada consecutiva



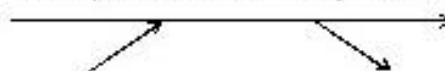
Rampa de salida aislada



Rampa de salida consecutivas



Rampas de entrada y salida



Enlaces

Los puntos críticos de los efectos de las enlaces en las autopistas son los puntos de incorporación (rampas de entrada) y desincorporación (rampas de salida).

Sistemas de Vías Rápidas

Análisis Combinado de Segmentos de Vías Rápidas

(a) DISEÑO

Paso 1: Establecer el nivel de servicio para el diseño, el volumen de demanda, características del tráfico, alineación vertical y horizontal y ubicación aproximada de las rampas.

Paso 2: Determinar el número de carriles requerido para cada segmento básico de autopista

- Secciones entre rampas e intersecciones mayores
- Pendientes significativas
 - > 400 mts, $P \geq 3\%$
 - > 800 mts, $P < 3\%$

Paso 3: Analizar los enlaces

- Aisladas
- Con rampas adyacentes después del conflicto
- Con rampas adyacentes antes del conflicto

Paso 4: Analizar las secciones de entrecruce

Paso 5: Alterar el diseño y repetir los pasos 2, 3 y 4 hasta que los resultados sean satisfactorios

(b) ANÁLISIS

Paso 1: Determinar el nivel de servicio para cada segmento básico de autopista

Paso 2: Determinar el nivel de servicio para cada rampa

- Aislada
- Con rampa adyacente después del conflicto
- Con rampa adyacente antes del conflicto

Paso 3: Determinar los niveles de servicio para las secciones de entrecruce

CAPITULO IX. CAPACIDAD DE INTERSECCIONES SEMAFORIZADAS

1. INTRODUCCIÓN

Capacidad: Es la tasa de volumen máximo que puede pasar por una intersección desde un acceso, bajo condiciones prevalecientes.

Condiciones Prevalecientes: Son condiciones existentes que influyen directamente en la capacidad de las vías. Estas se enumeran a continuación:

- a) Condiciones del Tránsito: Volúmenes de tránsito, porcentaje de vehículos que giran a la izquierda, porcentaje de vehículos que giran a la derecha, porcentaje de vehículos pesados, cantidad de autobuses, estacionamiento sobre la vía, volumen de peatones, factor de hora de máxima demanda (FHMD), y tipo de llegadas.
- b) Condiciones de la Vía: Cantidad de carriles de circulación, ancho de los carriles, pendientes, y uso de los carriles de circulación.
- c) Condiciones de Semaforización: Fases, tiempos de las fases, tipo de control, y progresión.

Niveles de Análisis: Existen dos tipos de análisis en la metodología del Highway Capacity Manual (HCM). Estos se mencionan a continuación.

(a) Análisis Operacional: el análisis operacional del HCM se divide en cinco módulos:

1. Módulo de Entradas:

- Condiciones Geométricas
- Condiciones de Tránsito
- Condiciones de Semaforización

2. Módulo de Ajustes de Volúmenes de Tránsito:

- Factor de Hora de Máxima Demanda
- Establecimiento de grupos de carriles de circulación
- Asignación de Volúmenes de tránsito a los grupos de carriles de circulación

3. Módulo de Tasas o Índices de Saturación:

- Flujo de Saturación Ideal
- Ajustes

4. Módulo de Análisis de Capacidad:

- Cálculo de las capacidades de los grupos de carriles de circulación
- Cálculo de las relaciones volumen/capacidad de los grupos de carriles de circulación
- Reunir los resultados

5. Módulo de Nivel de Servicio:

- Cálculo de las demoras de los grupos de carriles de circulación
- Reúnen las demoras
- Determinar los niveles de servicio

(b) Análisis de Planeación: En el análisis de planeación sólo se realizan dos actividades. En este nivel de análisis no se obtienen niveles de servicio. Sin embargo se obtienen criterios acerca de la intersección con respecto a su funcionamiento (funciona bajo capacidad, cerca de la capacidad o sobre capacidad).

- Suma de volúmenes críticos por carril
- Verificar la capacidad de la intersección.

A continuación se discuten con más detalle los módulos del análisis operacional.

2. MÓDULO DE ENTRADA

En este módulo se recopilan los datos necesarios para efectuar un análisis operacional. Como se indicó anteriormente, para la evaluación operacional de intersecciones es necesario conocer las condiciones geométricas, de tránsito y de semaforización de la intersección bajo estudio. A continuación, en el cuadro 9.1, se enumeran los datos que son necesarios para cada una de las condiciones:

Cuadro 9.1. Datos Necesarios para la Evaluación de Intersecciones Semaforizadas

Tipo de Condición	Datos Necesarios
Condiciones Geométricas	<ul style="list-style-type: none"> • Tipo de Área • Número de Carriles • Ancho de Carriles (mts) • Pendientes (%) • Existencia de Carriles Exclusivos para giros a la izquierda o derecha. • Longitud de los carriles de giro • Condiciones de Estacionamiento
Condiciones de Tránsito	<ul style="list-style-type: none"> • Volúmenes por movimiento izquierda, derecha y derecho en vehículos por hora (vph) • Factor de Hora de Máxima Demanda (FHMD) • Porcentaje de Vehículos Pesados • Volumen de Peatones Conflictivos (peat. /hora) • Número de Autobuses que se paran en la intersección • Actividad de Estacionamiento en maniobras de estacionamientos por hora • Tipo de llegada
Condiciones de Semaforización	<ul style="list-style-type: none"> • Longitud del ciclo en segundos • Tiempos Verdes en segundos • Operación del semáforo (actuado vs. fijo) • Actuación para Peatones • Tiempo Verde Mínimo para Peatones • Plan de Fases

Tipos de Llegadas

Tipo 1: El peor. Una columna densa que llega al principio de la fase roja.

Tipo 2: Columna densa que llega a la mitad de la fase roja o una columna dispersa que llega durante toda la fase roja.

Tipo 3: Llegadas aleatorias, generalmente regidas por una distribución de Poisson.

Tipo 4: Columna densa que llega a la mitad de la fase verde o una columna dispersa que llega durante toda la fase verde.

Tipo 5: El mejor. Una columna densa que llega al inicio del verde.

Tipo 6: Este tipo de llegadas esta reservada para progresiones de calidad excepcional, en rutas con características de progresión ideales. Representa columnas densas a lo largo de un número de intersecciones cercanas unas de las otras con tránsito transversal mínimo, casi despreciable.

El tipo de llegada tiene una influencia importante en el estimado de las demoras y determinación de los niveles de servicio. A pesar que no hay parámetros definitivos para cuantificar el tipo de llegada, el valor a continuación es de utilidad:

$$R_p = P\left(\frac{C}{verd.efc.}\right)$$

El cuadro siguiente ilustra los posibles valores de R_p asociados con los tipos de llegada:

Tipo de Llegada	Rango de Razón de Columnas (R_p)	Valores Prefijados (R_p)	de Calidad de la Progresión
1	= 0.5	0.333	Muy Pobre
2	> 0.5 y = 0.85	0.667	Desfavorable
3	> 0.85 y = 1.15	1.000	Llegadas Aleatorias
4	> 1.15 y = 1.50	1.333	Favorable
5	> 1.50 y = 2	1.667	Altamente Favorable
6	> 2	2.000	Excepcional

Fase Verde Mínima Requerida por los Peatones

El tiempo mínimo requerido por los peatones para cruzar una intersección esta dado por la siguiente ecuación:

$$G_p = 7,0 + \left(\frac{W}{1.2}\right) - Y$$

donde,

verd.p = tiempo de verde mínimo requerido por los peatones, en segundos

A = distancia desde el borde de la banqueta hasta el centro del carril mas lejano de la vía que se intenta cruzar, o hasta el refugio (isla central de mas de 1,00 mts) mas cercano, en m.

AMAR. = intervalo de cambio, todo rojo mas amarillo, en segundos.

Valores Prefijados

En el cuadro 9.2 que se muestra enseguida, se presentan valores prefijados para el análisis de capacidad. Nótese que los citados valores prefijados están basados en datos recopilados en los EEUU. En otros países, estos valores pueden variar, y deben ser calibrados.

Cuadro 9.2
Valores Prefijados a Usar en los Análisis Operacionales y de Planeación

Características	Valor
Tránsito	
Tasa de Flujo de Saturación Ideal	1,900 vphvpc
Volumen Conflictivo de Peatones	Bajo: 50 peat./hr.; Moderado: 200; Alto: 400
Porcentaje de Vehículos Pesados	2
Pendiente (Porcentaje)	0
Número de Autobuses Parándose	0/hr.
Condiciones de estacionamiento	No hay estacionamiento
Tipo de Llegadas:	
Grupos de carriles con movimientos de frente	3 si aislada 4 si coordinada
Grupo de carriles sin movimiento recto	3
Factor de Hora Máxima Demanda	0.90
Factor de Utilización de Carril	ver cuadro 9.4
Semaforización y Geometría	
Tipo de Semáforos	Tiempo Fijo
Rango de longitud de ciclos	60-120 seg.
Tiempo perdido	3.0 seg./fase
Amarillo mas todo rojo	4.0 seg./fase
Tipo de área	No DCC (Distrito Central Comercial)
Ancho de Carriles	3.65 mts

3. MÓDULO DE AJUSTES DE VOLÚMENES

Cálculo del Factor de Hora de Máxima Demanda

El cálculo del factor de hora de máxima demanda se ilustra con el siguiente ejemplo.

El cuadro 9.3 presenta los volúmenes de un movimiento aforados en un afluente durante la hora de máxima demanda cada 15 minutos. Calcular el factor de hora de máxima demanda.

Cuadro 9.3 Ejemplo de Volúmenes aforados en la Hora de Máxima Demanda

Periodo	Conteo	Tasa de Flujo (vph)
5:15 - 5:30	200	800
5:30 - 5:45	250	1000
5:45 - 6:00	300	1200
6:00 - 6:15	150	600
Total	900	

Volumen durante la hora de máxima demanda = 900 vph.

Tasa de flujo durante los 15 minutos de máxima demanda = 1200 vph.

$$FHP = \frac{v}{4 \times v_{15\text{min}}}$$

$$v_p = \frac{v}{FHP}$$

donde, FHMD = factor hora de máxima demanda

v = volumen durante la hora de máxima demanda.

v_p = volumen ajustado por el factor de hora de máxima demanda

por lo tanto:

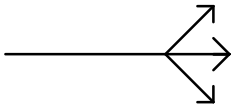
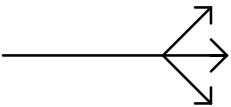

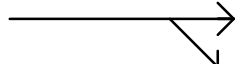

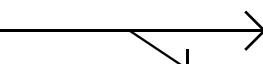
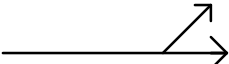
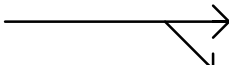
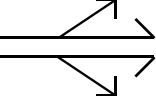
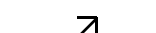
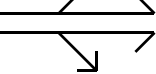
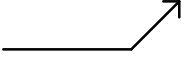
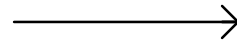
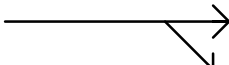
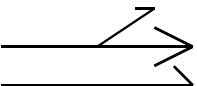
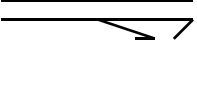

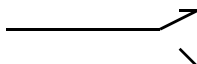
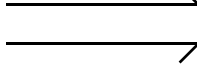
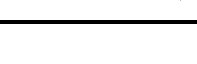
$$FHMD = 900 / (4 \times 300) = 0.75$$

$$v_p = 1200 \text{ vph.}$$

Determinación del Grupo de Carriles

En el cuadro 9.4 que se presenta a continuación se ilustran las diversas posibilidades para agrupar los carriles de acuerdo a los movimientos.

Cuadro 9.4 Posibilidades de Agrupamiento de Carriles

No. de Carriles	Movimientos por carril	Posibilidades de Agrupación
1	IZQ + DE FRENTE + DER 	1 
2	EXC IZQ  DE FRENTE + DER 	2 Posibilidades de grupo  
2	IZQ + REC  DE FRENTE + DER 	 1  0  2
3	EXC IZQ  DE FRENTE  DE FRENTE + DER 	 1  2  0  1  2  3

Las siguientes recomendaciones aplican para los agrupamientos de carriles:

1. Carriles exclusivos a la izquierda o derecha deben ser normalmente designados como un grupo de carriles separado. En caso de carriles compartidos de frente y giros a la derecha o izquierda, el grupo de carriles depende de la proporción de giros dentro del carril.
2. En afluentes con carriles a la izquierda o derecha exclusivos, todos los demás carriles en el afluente son considerados, por lo general, como un grupo de carriles.

3. Cuando un afluente con mas de un carril incluye un carril que es compartido por giros a la izquierda y tránsito de frente, es necesario determinar si las condiciones son equilibradas o si hay tantos giros a la izquierda que el carril actúa como un “carril exclusivo a la izquierda de facto”. Posteriormente se definirá la metodología para determinar lo anteriormente mencionado.

Ajustes por Distribución de Carriles

Después de que los volúmenes de tránsito han sido ajustados para reflejar las tasas de flujo máximo de 15 minutos y los grupos de carriles han sido establecidos, las tasas de flujo en cada uno de los grupos de carriles se ajustan para que reflejen las diferencias de distribución entre carriles. Cuando existe más de un carril, la distribución de los volúmenes de tránsito no es por lo general uniforme. El ajuste por utilización incrementa la tasa de flujo de tránsito de análisis para reflejar el efecto del tránsito en el carril mas utilizado. Por lo tanto:

$$v = v_g U$$

donde:

v = tasa de flujo ajustada para el grupo de carriles en vph.

v_g = tasa de flujo sin ajustar para el grupo de carriles, en vph.

U = factor de utilización de carril

Para calcular el factor de utilización de carriles:

$$U = \frac{(v_{gl} N)}{v_g}$$

donde:

v_{gl} = tasa de flujo sin ajustar en un carril con el mayor volumen en el grupo de carriles

N = número de carriles en el grupo de carriles

Cuando no se conoce la distribución de los volúmenes en un grupo de carriles, los valores que se asume de hecho se presentan en el cuadro a continuación aplican:

Cuadro 9.5
Factores de Utilización de carriles

Movimientos en el Grupo de Carriles	No. de Carriles en Grupo	% de Tránsito en carril mas usado	Factor de Utilización (U)
De frente o Compartido	1	100.0	1.00
	2	52.5	1.05
	3	36.7	1.10
Giro a la Izquierda Exclusivo	1	100.0	1.00
	2	51.5	1.03
Giro a la Derecha Exclusivo	1	100.0	1.00
	2	56.5	1.13

Ajustes para Giros a la Derecha permitidos en Rojo (GDR)

Cuando GDR se permite, el volumen de vehículos que giran a la derecha se reduce por el volumen que gira durante la fase roja para ese afluente. El número de vehículos que giran a la derecha en rojo es en función a una serie de factores:

- Distribución de los carriles en el afluente (compartidos o exclusivos)
- Demanda por movimientos a la derecha
- Visibilidad en el afluente
- Grado de saturación del flujo recto conflictivo
- Patrón de llegadas en el ciclo de semáforos
- Fases de Semáforos a la izquierda en la calle conflictiva
- Conflictos con peatones

Si no hay datos de campo, se recomienda no hacer reducciones a los giros a la derecha. Giros a la derecha libres se substraen del total de volumen para el afluente.

4. MÓDULO DE FLUJOS DE SATURACIÓN

El flujo, tasa o intensidad de saturación, es el flujo, expresado en vehículos por hora, que es servido por un grupo de carriles, asumiendo que la fase verde esta disponible indefinidamente para ese acceso. El flujo de saturación bajo condiciones prevalecientes para un grupo de carriles en una intersección determinada esta dado por:

$$s = s_0 \times N \times f_A \times f_{VH} \times f_p \times f_e \times f_{aut} \times f_a \times f_{DER} \times f_{IZQ}$$

donde, s = tasa de saturación para el grupo de carriles, esta se expresa como el total para todos los carriles en el grupo de carriles bajo condiciones prevalecientes, en vphpv (vehículos por hora por verde).

s_0 = tasa de saturación ideal por carril, por lo general 1900 vphpvpc (vehículos por hora por verde por carril).

N = número de carriles en el grupo de carriles

f_A = factor de ajuste por el ancho del carril.

f_{HV} = factor de ajuste para vehículos pesados.

f_p = factor de ajuste por pendiente del afluente

f_{aut} = factor de ajuste para el efecto de bloqueo de autobuses que se paran cerca de la intersección.

f_a = factor de ajuste para el tipo de área

f_{DER} = factor de ajuste para giros a la derecha en el grupo de carriles

f_{IZQ} = factor de ajuste para giros a la izquierda

En este módulo se calcula una tasa de flujo de saturación para cada grupo de carriles. Los cálculos comienzan con la selección de una tasa de saturación ideal, por lo general 1900 vphpc, y luego se ajusta de acuerdo con las condiciones prevalecientes.

Por supuesto, medidas en campo producen mejores resultados. En párrafos posteriores se detallara una metodología para medir los flujos de saturación en campo.

Factores de Ajuste

Cada factor toma en cuenta el impacto de una o varias de las condiciones prevalecientes que son diferentes a las condiciones ideales, para las cuales el flujo de saturación ideal es de 1900 vphpcpv (vehículos por hora por carril por verde).

Ajuste por ancho de carril (f_A): toma en cuenta el efecto de carriles angostos. El cuadro 9.5 y la fórmula que se presenta con este indican los ajustes para los diferentes anchos de carriles.

Tabla 9.5. Factores de ajuste por ancho de carril

Ancho de carriles	2.44	2.74	3.05	3.35	3.65	3.96	4.27	4.57	≥ 4.88
Factor de ancho de carriles	0.87	0.90	0.93	0.97	1.00	1.03	1.07	1.10	Usar 2 carriles

Nota: $f_A = 1 + \frac{A - 3.65}{9.14}$ A = 2.44 mts. (si A > 4.88 mts, se debe considerar un análisis de 2 carriles).

Ajustes para pendientes y vehículos pesados (f_{HV} y f_p) los factores están dados por las fórmulas y cuadros 9.6 y 9.7. El equivalente a vehículos de pasajeros (E_t) es 2.

Tabla 9.6. Factor de ajuste por vehículos pesados, f_{HV}

% vehículos pesados	0	2	4	6	8	10	15	20	25	30
Factor vehíc. pesados	1.00	0.98	0.962	0.943	0.926	0.909	0.870	0.833	0.800	0.769
% vehículos pesados	35	40	45	50	75	100				
Factor vehíc. pesados	0.741	0.714	0.690	0.667	0.571	0.500				

Nota: $f_{HV} = \frac{100}{100 + \% HV (E_t - 1)}$ 0 [%HV [100, donde E_t = 2.0 vehículos de pasajeros por vehículo pesado.

Tabla 9.7. Factor de ajuste por pendiente, f_p

	Bajando			Nivel	Subiendo		
Pendiente, %	-6	-4	-2	0	+2	+4	+6
Factor pendiente, f _p	1.03	1.2	1.01	1.00	0.99	0.98	0.97

Nota: $f_p = 1 - \frac{\% p}{200}$ -6 [%p [+10, p = pendiente

Ajustes por Actividad de estacionamiento (f_e): En el cuadro 9.8 se asume que cada maniobra de estacionamiento bloquea el tránsito por 18 segundos de promedio. El número de maniobras de estacionamiento que se usan para este ajuste son el número de maniobras por

hora en las áreas de estacionamiento adyacentes al grupo de carriles y dentro de 76 mts de la línea de alto.

Tabla 9.8. Factor de ajuste por estacionamiento, f_e

No. carriles en grupo de carriles N	Sin estac.	No. de vehículos estacionados por hora, N_m				
		0	10	20	30	40
1	1.00	0.90	0.85	0.80	0.75	0.70
2	1.00	0.95	0.92	0.89	0.87	0.85
3	1.00	0.97	0.95	0.93	0.91	0.89

Nota: $f_e = \frac{N - 0.0 - 18N_m / 3600}{N}$; $0 \leq N_m \leq 180$; $f_e = 0.05$; usar la fórmula para más de tres carriles o más de 40 maniobras por hora.

Factor de Ajuste para Bloqueo de Autobuses (f_{aut}): Aplica para paradas de autobuses a 76 mts de la línea de alto. Se asume un bloqueo promedio de 14.4 segundos. Para más precisión, referirse a manuales de transporte público. En la tabla 9.9 se muestra este factor.

Tabla 9.9. Factor de ajuste por obstrucción de autobuses, f_{bb}

No. de carriles en grup. de carriles, N	No. de autobuses parándose por hora, N_B				
	0	10	20	30	40
1	1.00	0.96	0.92	0.88	0.84
2	1.00	0.98	0.96	0.94	0.92
3	1.00	0.99	0.97	0.96	0.95

Nota: $f_{aut} = [N - 14.4N_B / 3600] / N$; $0 \leq N_B \leq 250$; $f_{aut} = 0.05$; usar la fórmula para más de tres carriles o más de 40 autobuses por hora.

Factor de Ajuste para Giros a la Derecha: Los factores para movimientos de giro dependen de una serie de factores. Los giros pueden operar de carriles compartidos o exclusivos, con fases (protegidos o permitidos), o con una combinación de las condiciones mencionadas. El factor de ajuste para giros a la derecha, f_{der} , depende de un número de variables:

1. El giro a la derecha se hace desde un carril exclusivo o uno compartido.
2. Tipo de fase de semáforo (protegida, permitida o permitida mas protegida)
3. Volumen de peatones que usan el cruce peatonal conflictivo.
4. Proporción de giros a la derecha en el carril compartido.
5. Proporción de giros a la derecha que usan la porción protegida de una fase protegida mas permitida.

El ítem 5 se puede determinar en campo, pero también puede ser estimado. Para estimarlo se asume que la proporción de vehículos que gira a la derecha durante la fase protegida es aproximadamente igual a la proporción de giros que es permitida. Si $P_{DERA} = 1.0$ (completamente protegido de peatones conflictivos), se usa un volumen de peatones de '0'. Un $f_{DER} = 1$ se usa si no hay giros a la derecha en el grupo de carriles.

Capacidad de Intersecciones Semaforizadas

Cuadro 9.10A
Factor de Ajuste para Giros a la Derecha (GD), Fórmulas

Casos 1-6: Carriles Exclusivos/Compartidos				
$f_{DER} = 1.0 - P_{RT} [0.15 + (Peat/2100)(1 - P_{DER})]$ $0.0 = P_{DER} = 1.0$ $0.0 = P_{DERA} = 1.0$ $0 = Peat. = 1700$ $f_{RT} = 0.05$	Proporción de giros der. en grupo de carriles = 1.0 para carriles exc. (Casos 1-3); < 1 para carriles compartidos (Casos 4 - 6) Proporción de giros der. usando la fase protegida = 1.0 para protección completa-sin peatones; < 1.0 para permitido con peat. conflictivos Volumen (peat/hr) de peatones en conflicto con giros der. (si peat > 1700, usar 1700)			
Caso 7: Afluente de un solo carril				
$f_{DER} = 0.90 - P_{RT} [0.135 + (Peat/2100)]$ $0.0 = P_{DER} = 1.0$ $0 = Peat. = 1700$ $f_{RT} = 1.00$ si $P_{RT} = 0.0$ $f_{RT} = 0.05$	Proporción de Giros a la Derecha en el Grupo de Carriles Volumen (Peat/hr) o peat. conflictivos con giros der. (usar 0 si GD completamente protegido)			
Rango de Valores Variables				
Caso	P _{DER}	P _{DERA}	PEAT.	Fórmula Simplificada
1 Carril GD Excl.; fase der. proteg.	1.0	1.0	0	0.85
2 Carril GD Excl.; fase der. perm.	1.0	0.0	0-1700	$0.85 - (Peat. / 2100)$
3 Carril GD Excl.; fase prot. + perm.	1.0	0-1.0	0-1700	$0.85 - (Peat. / 2100)(1 - P_{DERA})$
4 Carril GD Compartido; fase prot.	0-1.0	1.0	0	$1.0 - P_{RT} [0.15]$
5 Carril GD Compartido; fase perm.	0-1.0	0.0	0-1700	$1.0 - P_{RT} [0.15 + (Peat./2100)]$
6 Carril GD Compart.; prot. + perm.	0-1.0	0-1.0	0-1700	$1.0 - P_{RT} [0.15 + (Peat./2100)(1 - P_{DERA})]$
7 Afluente de un solo carril	0-1.0	-	0-1700	$0.9 - P_{RT} [0.135 + (Peat./2100)]$

Cuadro 9.10B. Factores de Ajuste para Giros a la Derecha (GD); Factores

Caso	P _{DERA}	Peat.	Proporción de GD en Grupo de Carriles, P _{DER}					
			Casos 4, 5, 6					Casos 1,2,3
			0	.2	.4	.6	.8	1.0
2 y 5	0	0	1.0	.970	.940	.910	.880	.850
		50 (bajo)	1.0	.965	.930	.896	.861	.826
		100	1.0	.960	.921	.881	.842	.802
		200 (Mod.)	1.0	.951	.902	.853	.804	.755
		400 (Alto)	1.0	.932	.864	.796	.728	.660
		800	1.0	.894	.788	.681	.575	.469
		1200	1.0	.856	.711	.567	.423	.279
		= 1700	1.0	.808	.616	.424	.232	.050
3 y 6	.20	0	1.0	.970	.940	.910	.880	.850
		50 (bajo)	1.0	.966	.932	.899	.865	.831
		100	1.0	.962	.925	.887	.850	.812
		200 (Mod.)	1.0	.955	.910	.864	.819	.774
		400 (Alto)	1.0	.940	.879	.819	.758	.698
		800	1.0	.909	.818	.727	.636	.545
		1200	1.0	.879	.757	.636	.514	.393
		= 1700	1.0	.840	.681	.521	.362	.202
	.40	0	1.0	.970	.940	.910	.880	.850
		50 (bajo)	1.0	.967	.934	.901	.869	.836
		100	1.0	.964	.929	.893	.857	.821
		200 (Mod.)	1.0	.959	.917	.876	.834	.793
		400 (Alto)	1.0	.947	.894	.841	.789	.736
		800	1.0	.924	.849	.773	.697	.621
		1200	1.0	.901	.803	.704	.606	.507
		= 1700	1.0	.873	.746	.619	.491	.364
	.60	0	1.0	.970	.940	.910	.880	.850
		50 (bajo)	1.0	.968	.936	.904	.872	.840
		100	1.0	.966	.932	.899	.865	.831
		200 (Mod.)	1.0	.962	.925	.887	.850	.812
400 (Alto)		1.0	.955	.910	.864	.819	.774	
800		1.0	.940	.879	.819	.758	.698	
1200		1.0	.924	.849	.773	.697	.621	
= 1700		1.0	.905	.810	.716	.621	.526	
.80	0	1.0	.970	.940	.910	.880	.850	
	50 (bajo)	1.0	.969	.938	.907	.876	.845	
	100	1.0	.968	.936	.904	.872	.840	
	200 (Mod.)	1.0	.966	.932	.899	.865	.831	
	400 (Alto)	1.0	.962	.925	.887	.850	.812	
	800	1.0	.955	.910	.864	.819	.774	
	1200	1.0	.947	.894	.841	.789	.736	
	= 1700	1.0	.938	.875	.813	.750	.688	
1 y 4	1.00	0	1.0	.970	.940	.910	.880	.850
7	-	0	1.0	.873	.846	.819	.792	.765
		50 (bajo)	1.0	.868	.836	.805	.773	.741
		100	1.0	.863	.827	.790	.754	.717
		200 (Mod.)	1.0	.854	.808	.762	.716	.670
		400 (Alto)	1.0	.835	.770	.705	.640	.575
		800	1.0	.797	.694	.590	.487	.384
		1200	1.0	.759	.617	.476	.335	.194
		= 1700	1.0	.711	.522	.333	.144	.050

Factor de Ajuste para Giros a la Izquierda: El factor es basado en variables parecidas a las de giros a la derecha:

1. El giro a la izquierda se hace de carriles exclusivos o compartidos
2. Tipo de fases (protegida, permitida, o protegida mas permitida)
3. Proporción de vehículos que giran a la izquierda en un grupo que comparte carriles.
4. Tasa de flujo opuesto al giro a la izquierda.

Capacidad de Intersecciones Semaforizadas

El factor es 1 si no hay giros a la izquierda en el grupo de carriles.

Tabla 9.11 Factor de Ajuste para Giros a la Izquierda

Caso	Tipo de Grupo de Carriles	Factor de Giro a la Izquierda, f_{LT}						
1	Carril a la Izq. Excl. Fase Protegida	0.95						
2	Carril a la Izq. Exc; Fase Perm.	Procedimiento Especial; Fig. 9.8 y 9.9						
3	Carril a la Izq. Exc.; Fase perm. + prot.	Aplica Caso 1 de fase protegida Aplica Caso 2 de fase permitida						
4	Carril compartido a la Izq.	$f_{LT} = 1.0 / (1.0 + 0.05 P_{LT})$						
		Prop. De Giros a la Izq. en carril P_{LT}	0.0	0.20	0.40	0.60	0.80	1.00
	Fase prot.	Factor	1.00	0.99	0.98	0.97	0.96	0.95
5	Carril comp. Fase perm.	Procedimiento Especial; Fig. 9.8 y 9.9						
6	Carril comp. Fase Protegida mas permitida	$f_{LT} = (1400 - V_o) / [(1400 - V_o) + (235 + 0.435 V_o) P_{LT}]$ $V_o \leq 1220$ vph $f_{LT} = 1 / [1 + 4.525 P_{LT}]$ $V_o > 1220$ vph						
		Volumen Opuesto, V_o	Prop. de Giros a la Izquierda, P_{LT}					
			0.0	0.20	0.40	0.60	0.80	1.00
		0	1.00	0.97	0.94	0.91	0.88	0.86
	200	1.00	0.95	0.90	0.86	0.82	0.78	
	400	1.00	0.92	0.85	0.80	0.75	0.70	
	600	1.00	0.88	0.79	0.72	0.66	0.61	
	800	1.00	0.83	0.71	0.62	0.55	0.49	
	1000	1.00	0.74	0.58	0.48	0.41	0.36	
	1200	1.00	0.55	0.38	0.29	0.24	0.20	
	≥ 1220	1.00	0.52	0.36	0.27	0.22	0.18	

Cuando un giro a la izquierda no es opuesto al flujo vehicular pero tiene conflictos con el flujo de peatones, entonces se aplican los factores para giros a la derecha. Si no hay peatones conflictivos, se aplica el factor para giros a la izquierda protegidos.

Los factores de ajuste en la tabla 9.11 reflejan siete condiciones diferentes para giros a la izquierda:

- Caso 1: Carril exclusivo con fase protegida
- Caso 2: Carril exclusivo con fase permitida
- Caso 3: Carril exclusivo con fase protegida mas permitida
- Caso 4: Carril compartido con fase protegida
- Caso 5: Carril compartido con fase permitida
- Caso 6: Carril compartido con fase protegida mas permitida
- Caso 7: Afluente de un solo carril (factores de giro a la derecha)

Factor de Ajuste por Tipo de Area (f_a).- Evaluación de las condiciones del área de estudio, ya que las características de un Centro de Negocios (CBD) difiere por la movilidad a otro tipo.

Tabla 9.12. Factor de ajuste por tipo de área

Tipo de área	Factor f_a
CBD	0.90
Otras áreas	1.00

Procedimiento Especial: Factor de Ajuste para Giros a la Izquierda con Fase Permitida

El impacto de giros a la izquierda permitidos es más complicado que el de otros movimientos. El procedimiento que se describe a continuación aplica a los casos 2, 3 y 5.

Caso Básico: giros a la izquierda permitidos desde un carril compartido o exclusivo. No se toma en cuenta el caso de fase permitida mas protegida.

Supóngase giros a la izquierda esperando en rojo con una cola de vehículos de movimiento recto en el afluente opuesto. Cuando inicia el verde, la cola opuesta comienza a moverse. Mientras la cola no se disipa , los vehículos que pretenden girar a la izquierda están bloqueados. La porción de verde efectivo que es bloqueado por la cola opuesta se va a designar como “verd._q”. Durante este tiempo, el carril compartido desde el cual se hace el giro a la izquierda también se bloquea cuando un giro a la izquierda esta de primero. Sin embargo, el carril compartido se bloquea solo cuando llega un giro a la izquierda, del resto no es afectado. La porción del verde efectivo hasta que llega el primer giro a la izquierda se va a designar como “verd._i”.

Una vez que la cola opuesta se disipa, los giros a la izquierda se filtran a través de brechas en el flujo opuesto (estas brechas dependen de la cantidad de flujo opuesto). La porción de verde efectivo durante la cual los giros a la izquierda se filtran a través del flujo opuesto se designa como “verd._u”.

Esta división del verde efectivo para giros a la izquierda permitidos crea tres periodos distintos para los cuales se debe considerar el efecto de los giros a la izquierda en un carril compartido o exclusivo:

- $verd_i$: un carril compartido no es afectado por giros a la izquierda hasta que llega un vehículo que pretende cruzar a la izquierda. Durante este periodo de tiempo, el factor de ajuste efectivo para giros a la izquierda es lógicamente 1, ya que no hay giros a la

izquierda presentes. Por definición, $verd_f = 0.0$ seg. para carriles exclusivos (fase permitida) a la izquierda, ya que se supone que existe una cola de vehículos que giran a la izquierda al principio de la fase.

- $verd_q - verd_f$: Si el primer vehículo a la izquierda llega antes que la cola opuesta se haya disipado, este espera hasta que la cola se disipe y bloquea el carril compartido hasta que consigue una brecha lo suficientemente grande como para efectuar el giro. Durante este periodo no hay movimiento en el carril compartido y el factor de giro a la izquierda es 0.0. Cuando el primer vehículo a la izquierda llega después que la cola opuesta se disipa, este periodo de tiempo no existe; $verd_q - verd_f$ tiene un valor mínimo práctico de cero. El valor de $verd_q$ tiene un rango práctico de 0.0 a verde efectivo.
- Después que la cola opuesta se disipa, los vehículos a la izquierda seleccionan brechas en el flujo opuesto para efectuar su movimiento. Durante este periodo en la tabla 9.13 se le asignan E_{L1} equivalentes a vehículos rectos por cada vehículo que gira a la izquierda. Un factor de ajuste puede ser calculado para este periodo:

$$1/[1.0 + P_L (E_{L1} - 1)]$$

donde P_L es la proporción de vehículos que giran a la izquierda en el carril compartido. Para carriles exclusivos a la izquierda, $P_L = 1.0$.

Tabla 9.13
Equivalentes a vehículos de paso, E_{L1} , para giros a la izquierda (5)

N° Total de Fases	Tipo de Carril Izq.	N° de Carriles Op.	Flujos Opuestos						
			0	200	400	600	800	1000	μ 1200
2	Compart.	1	1.05	2.0	3.3	6.5	16.0*	16.0*	16.0*
		2	1.05	1.9	2.6	3.6	6.0	16.0*	16.0*
		μ 3	1.05	1.8	2.5	3.4	4.5	6.0	16.0*
	Excl.	1	1.05	1.7	2.6	4.7	10.4*	10.4*	10.4*
		2	1.05	1.6	2.2	2.9	4.1	6.2	10.4*
		μ 3	1.05	1.6	2.1	2.8	3.6	4.8	10.4*
μ 2	Compart.	1	1.05	2.2	4.5	11.0*	11.0*	11.0*	11.0*
		2	1.05	2.0	3.1	4.7	11.0*	11.0*	11.0*
		μ 3	1.05	2.0	2.9	4.2	6.0	11.0*	11.0*
	Excl.	1	1.05	1.8	3.3	8.2*	8.2*	8.2*	8.2*
		2	1.05	1.7	2.4	3.6	3.6	8.2*	8.2*
		μ 3	1.05	1.7	2.4	3.3	3.3	6.8	8.2*

Modelo Básico para Afluentes de Carriles Múltiples y Carriles Exclusivos, Fase Permitida

El factor de ajuste para el carril en el cual se realizan los giros a la izquierda permitidos viene dado por la siguiente ecuación:

$$f_m = \left(\frac{verd_f}{verd.efc.} \right) + \left(\frac{verd_u}{verd.efc.} \right) \left(\frac{1}{1 + P_L (E_{L1} - 1)} \right)$$

Nótese que en la fórmula no hay un término para tomar en cuenta a los sneakers, éstos son los vehículos que giran a la izquierda durante el intervalo de desalojo. Lo anterior se debe a que en las medidas de las tasas de saturación, los vehículos se cuentan cuando entran en la

intersección, no cuando la dejan. Sin embargo, hay un número mínimo práctico de giros a la izquierda que se hacen en cada fase, definidos por los sneakers.

Para tomar en cuenta esto, se debe imponer un valor mínimo práctico en f_m . Un sneaker por ciclo se asume como mínimo. La probabilidad de que un segundo sneaker esté en posición al final de la fase es igual a la proporción de giros a la izquierda en el carril compartido, P_L . El número de sneakers por ciclo aproximado es $(1 + P_L)$. Asumiendo un intervalo de saturación de 2 segundos para un carril exclusivo en una fase protegida, el valor mínimo práctico de f_m puede ser estimado como $2(1 + P_L)/verd.efc.$

Para grupos con varios carriles, el impacto de los giros a la izquierda sobre el carril compartido debe ser extendido para incluir el impacto sobre todo el grupo de carriles. Se puede asumir que el factor para el carril compartido es f_m y que todos los demás carriles en el grupo tienen factor 1.0. Esto asume que los giros a la izquierda solo afectan al carril que los contiene, y eso no es cierto. Estudios de regresiones estadísticas sugieren que la siguiente relación es más realista:

$$f_{IZQ} = \frac{f_m + 0.91(N - 1)}{N}$$

donde,

f_{IZQ} = factor de ajuste para giros a la izquierda aplicado a todo el grupo de carriles que contiene a los giros a la izquierda.

f_m = factor de ajuste que aplica solo al carril desde el cual se realizan los giros a la izquierda.

En caso de un carril (o dos) exclusivos a la izquierda con fase permitida, entonces $f_{IZQ} = f_m$.

Para implementar este modelo, es necesario estimar las subporciones del verde efectivo, $verd_f$, $verd_q$, y $verd_u$. Se han desarrollado relaciones de regresiones estadísticas para permitir esto:

1. Cálculo de $verd_f$:

$$verd_f = VERDE \exp(-0.882 IZQC^{0.717}) - t_L$$

(carriles a la izquierda compartidos en fase permitida)

$$verd_f = 0.0 \text{ para carriles exclusivos, fase permitida; } 0 = verd_f = verd.efc.$$

donde;

VERD.= duración del intervalo verde del semáforo.

LTC = giros a la izquierda por ciclo, vpc, calculado como $v_{IZQ}C/3600$

v_{IZQ} = tasa de flujo a la izquierda ajustada, vph

C = longitud del ciclo, en segundos

t_L = tiempo perdido por fase, segundos.

2. Cálculo de $verd_q$:

$$verd_q = 4.943 v_{olc}^{0.762} qr_o^{1.061} - t_L; 0.0 = verd_q = verd. efc.$$

donde,

Capacidad de Intersecciones Semaforizadas

v_{olc} = tasa de flujo opuesto ajustado por carril por ciclo, calculada como $v_o C / 3600$, vpcpc (vehículos por carril por ciclo);

v_o = tasa de flujo opuesto ajustada, vph;

qr_o = proporción de cola opuesta, la proporción del flujo opuesto que se origina en la cola opuesta, se calcula como: $1 - R_{po} (verd_o / C)$

R_{po} = proporción de columna; se obtiene del cuadro de tipos de llegada y esta basado en el tipo de llegada.

$verd_o$ = verde efectivo para el flujo opuesto, seg.

3. Cálculo de $verd_u$:

$verd_u = verd.efc. - verd_q$; cuando $verd_q = verd_f$

$verd_u = verd.efc. - verd_f$; cuando $verd_q < verd_f$

donde:

$verd.efc.$ = verde efectivo para el giro a la izquierda permitido, seg.

Nota: cuando $verd_q < verd_f$; o sea, cuando el primer vehículo que gira a la izquierda no llega hasta que la cola opuesta se ha desalojado, se aplica un factor efectivo de ajuste de 1.0 a lo largo de $verd_f$, y un factor basado en E_{L1} posteriormente.

4. Calcular P_{IZ} , la proporción de giros a la izquierda en el carril compartido:

$$P_{IZ} = P_{IZQ} \left(1 + \frac{(N-1)verd.efc.}{(f_s verd_u + 4.5)} \right)$$

$$f_s = \frac{875 - 0.625v_o}{1000}; \quad f_s \text{ m} 0$$

donde:

P_{IZQ} = proporción de giros a la izquierda en el grupo de carriles

N = número de carriles en el grupo de carriles

f_s = factor de saturación para giros a la izquierda

Nota: cuando se trata de un carril exclusivo a la izquierda, $P_{IZ} = P_{IZQ} = 1.0$

5. Seleccionar el valor apropiado de E_{L1} del cuadro 9.13, basado en la tasa de flujo opuesto, v_o , y el número de carriles opuestos, N_o . Para determinar v_o y N_o , los giros opuestos a la derecha e izquierda que se hacen de carriles exclusivos no están incluidos en v_o ; ni tampoco los carriles exclusivos en N_o .

6. Calcule f_m utilizando la ecuación que se repite a continuación:

$$f_m = \left(\frac{verd_f}{verd.efc.} \right) + \left(\frac{verd_u}{verd.efc.} \right) \left(\frac{1}{1 + P_L (E_{L1} - 1)} \right)$$

7. Calcular f_{IZQ} utilizando la ecuación que se repite a continuación:

$$f_{IZQ} = \frac{f_m + 0.91(N-1)}{N}$$

Modelo básico para afluentes de un solo carril opuesto por un afluente de un solo carril

En este caso, un vehículo que gira a la izquierda en el afluente opuesto crea una brecha en el flujo opuesto a través del cual el giro a la izquierda en cuestión se puede realizar. Esto puede ocurrir mientras la cola opuesta se desaloja o durante la porción no saturada del verde.

Por lo tanto, lo que se asume en el modelo de afluentes de varios carriles, que no hay flujo a la izquierda durante $verd_q - verd_f$ (donde $verd_q > verd_f$) no se puede aplicar para afluentes de un solo carril, en los cuales hay flujo durante ese periodo a una tasa reducida, reflejando el efecto de bloqueo de los vehículos que giran a la izquierda, mientras ellos esperan un giro opuesto a la izquierda. A los vehículos que giran a la izquierda durante el periodo $verd_q - verd_f$, se les asigna un valor equivalente a movimiento recto, E_{L2} , basado en un análisis de colas simple, y esto puede ser convertido en un análisis de aplicación durante este periodo de verde.

Debido a que en un afluente de un solo carril los vehículos no tienen la posibilidad de escoger carriles, las regresiones para predecir los valores de $verd_f$ y $verd_q$ son diferentes a los casos anteriores. Además, para un afluente de un solo carril, $f_{LT} = f_m$, y $P_{IZ} = P_{IZQ}$. Tal y como sucede en el caso de afluentes de carriles múltiples, el modelo de un solo carril opuesto no tiene un término para tomar en cuenta a los 'sneakers' pero tiene un valor práctico mínimo de :

$$f_{IZQ} = 2(1 + P_{IZQ})/verd.efc.$$

El modelo básico para afluentes opuestos de un solo carril es:

$$f_{IZQ} = \left(\frac{verd_f}{verd.efc.} \right) + \left(\frac{verd_{dif}}{verd.efc.} \right) \left(\frac{1}{1 + P_{IZQ}(E_{L1} - 1)} \right) + \left(\frac{verd_u}{verd.efc.} \right) \left(\frac{1}{1 + P_{IZQ}(E_{L1} - 1)} \right)$$

donde:

$$verd_{dif} = \max(verd_q - verd_f, 0)$$

Para implementar este modelo, es necesario determinar las porciones de $verd_f$, $verd_q$, y $verd_u$; como se indica a continuación.

1. Cálculo de $verd_f$

$$verd_f = VERD \exp(-0.860IZQC^{0.629}) - t_L; \quad 0 \leq P \leq 1 \quad P \leq verd_f \leq P \cdot verd.efc.$$

donde:

VERD = intervalo verde del semáforo, seg.;

IZQC = giros a la izquierda por ciclo, calculado como $v_{IZQ}C/3600$;

v_{IZQ} = tasa de flujo ajustada de giros a la izquierda, vph

Capacidad de Intersecciones Semaforizadas

C = longitud del ciclo, seg.; y
 t_L = tiempo perdido por fase, seg.

2. Cálculo de $verd_q$

$$verd_q = 4.943 v_{olc}^{0.762} qr_o^{1.061} - t_L \quad ; \quad 0.0 P \text{ verd}_q P \text{ verd.etc.}$$

donde:

v_{olc} = tasa de flujo opuesto ajustado por carril y por ciclo, calculada como $v_o C / 3600$,
 vpcpc (vehículos por carril por ciclo)

v_o = tasa de flujo opuesto ajustada, vph;

qr_o = proporción de volumen opuesto que se origina en la cola opuesta

R_{po} = proporción de columna para el flujo opuesto, esta basada en el tipo de llegada;

$verd_o$ = verde efectivo para el flujo opuesto, seg.

3. Cálculo de $verd_u$:

$$\begin{aligned} verd_u &= verd.etc. - verd_q && \text{cuando } verd_q \geq verd_f \\ verd_u &= verd.etc. - verd_f && \text{cuando } verd_q < verd_f \end{aligned}$$

donde:

$verd.etc.$ = verde efectivo para el giro a la izquierda permitido en cuestión, seg.

Nota: cuando $verd_q < verd_f$; o sea, cuando el primer vehículo que gira a la izquierda no llega hasta que la cola opuesta se ha desalojado, se aplica un factor efectivo de ajuste de 1.0 a lo largo de $verd_f$, y un factor basado en E_{L1} posteriormente.

4. Seleccionar el valor apropiado de E_{L1} del cuadro 9.13, basado en la tasa de flujo opuesto, v_o , y el número de carriles opuestos, N_o .

5. Cálculo de E_{L2} :

$$E_{L2} = (1 - P_{rect_o}^n) / P_{IZQ_o}$$

donde:

P_{IZQ_o} = proporción de giros a la izquierda en el afluyente opuesto de un solo carril;

P_{RECT_o} = proporción de vehículos que van recto y giran a la derecha en el afluyente opuesto de un solo carril, se calcula como $1 - P_{IZQ_o}$

n = número máximo de vehículos opuestos que pueden llegar durante $verd_q - verd_f$; calculado como $(verd_q - verd_f) / 2$. Nótese que 'n' tiene un valor mínimo de '0'.

6. Calcule ' f_{izq} ' utilizando la fórmula que se repite a continuación:

$$f_{IZQ} = \left(\frac{verd_f}{verd.etc.} \right) + \left(\frac{verd_{dif}}{verd.etc.} \left(\frac{1}{1 + P_{IZQ}(E_{L1} - 1)} \right) \right) + \left(\frac{verd_u}{verd.etc.} \left(\frac{1}{1 + P_{IZQ}(E_{L1} - 1)} \right) \right)$$

Casos Especiales para giros a la izquierda permitidos

Es necesario tomar en cuenta dos casos especiales de giros a la izquierda permitidos: un afluyente de un solo carril opuesto por un afluyente de carriles múltiples y viceversa.

Cuando el afluyente en cuestión es el afluyente de un solo carril y, el afluyente opuesto es de carriles múltiples. En este caso, los giros a la izquierda opuestos no abren brechas en el flujo opuesto. Por lo tanto, la estructura del modelo de un solo afluyente no es aplicable. El modelo de carriles múltiples aplica con la excepción de que $f_{IZQ} = f_m$. El valor de $verd_f$, sin embargo, debe ser calculado usando la ecuación para afluentes de un solo carril,

$$verd_f = VERD \exp(-0.86 IZQC^{0.629}) - t_L .$$

Cuando se considera un afluyente de carriles múltiples, se cumple lo contrario. El flujo opuesto es en un solo carril y los giros opuestos a la izquierda pueden abrir brechas para los giros a la izquierda en cuestión. El modelo para afluentes de un solo carril puede ser usado con varias revisiones:

- $verd_f$ debe ser calculado usando la ecuación para carriles múltiples:

$$verd_f = VERD \exp(-0.882 IZQC^{0.717}) - t_L$$

- P_{IZ} debe ser estimado y sustituido por P_{IZQ} en el modelo de un solo carril. P_{IZ} puede ser estimado de P_{IZQ} usando las ecuaciones para carriles múltiples:

$$P_{IZ} = P_{IZQ} \left(1 + \frac{(N-1)verd.efc.}{(f_s verd_u + 4.5)} \right)$$

$$f_s = \frac{875 - 0.625v_0}{1000}$$

- f_{IZQ} no es igual a f_m . Por lo tanto, la conversión debe ser hecha usando las ecuaciones para carriles múltiples, exceptuando cuando el afluyente en cuestión es un carril a la izquierda doble.

$$f_{IZQ} = \frac{f_m + 0.91(N-1)}{N}$$

Hay planillas que pueden ser usadas para los procedimientos de los modelos especiales para giros a la izquierda permitidos y que se presentan posteriormente. Sin embargo, éstas no toman en cuenta las modificaciones que hay que hacer para analizar afluentes de un solo carril opuestos por afluentes de carriles múltiples y viceversa.

Los modelos discutidos no toman en cuenta fases protegidas/permitidas. En general fases protegidas mas permitidas para carriles exclusivos a la izquierda son analizadas separando las

porciones de la fase en dos grupos de carriles. Cada porción de la fase es analizada normalmente, como si la otra no existiera. La porción de la fase que es protegida se trata como tal, seleccionando un factor de ajuste para giros a la izquierda apropiado para fases protegidas. La porción permitida de la fase es tratada como tal y los procedimientos explicados aquí aplican.

Haciendo lo anteriormente indicado, se determinan tasas de flujo de saturación separadas para cada porción de la fase. Una metodología para estimar las demoras en estos casos se describe posteriormente. Este método no requiere que se divida al volumen en las dos porciones de la fase (protegido mas permitido). Sin embargo, los cálculos de la relación v/c crítica, X_c , requieren que se haga esta división. A continuación se presenta un método razonable y conservador para dividir el volumen a la izquierda en las dos porciones de la fase protegida mas permitida, para los efectos del cálculo de X_c :

- La primera porción de la fase, sea protegida o permitida, se asume que es utilizada en su totalidad, con un $v/c = 1$, a menos que la demanda sea insuficiente para usar esa porción de la fase.
- Cualquier demanda remanente que no haya sido servida por esta porción de la fase es asignada a la segunda porción de la fase, protegida o permitida.

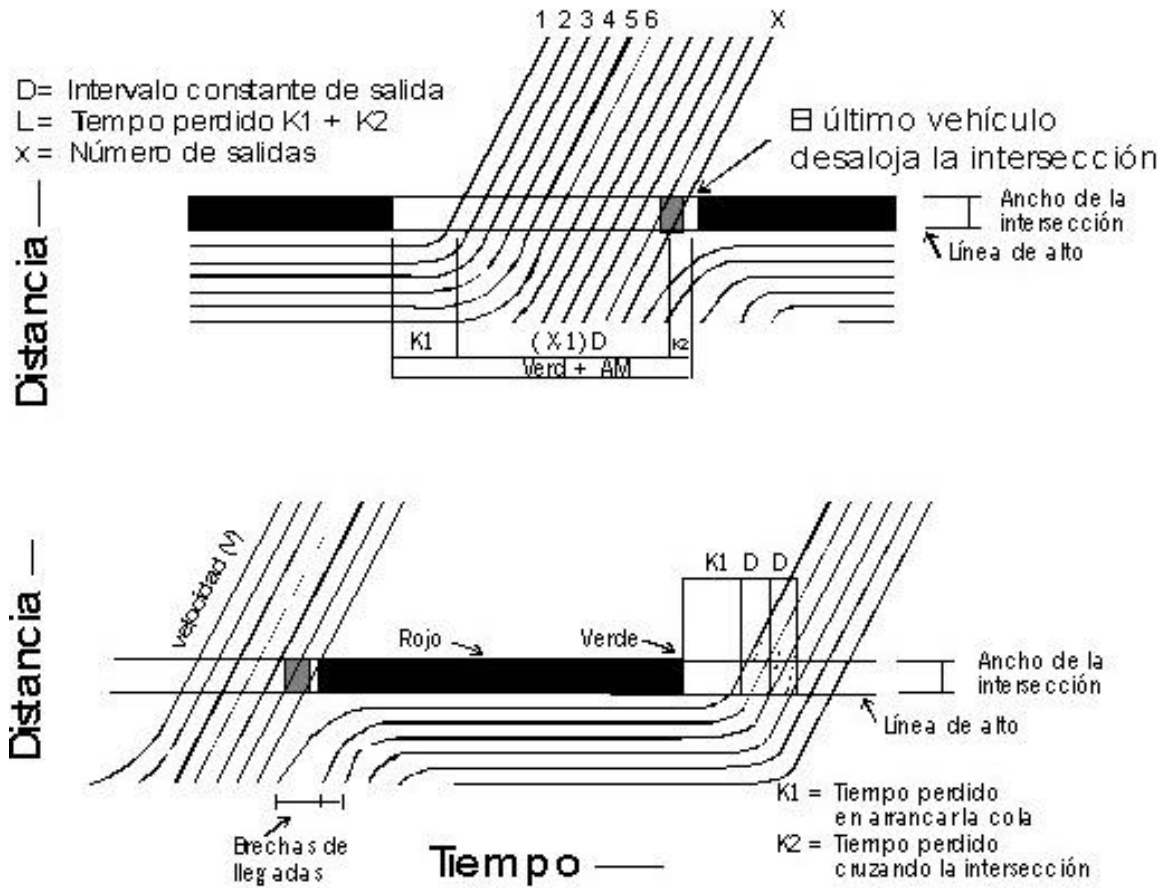
Este procedimiento asume que, cuando se inicia el movimiento, hay una cola disponible que usa la capacidad de la porción inicial de la fase. En casos de una falla del ciclo, la parte de la cola no servida existe al final de la segunda porción de la fase, con los vehículos en la cola y listos para usar la porción inicial de la fase a la izquierda en el ciclo siguiente. La parte inicial del movimiento no puede operar nunca con un $v/c > 1.0$.

En el análisis de la porciones permitida de este tipo de fases a la izquierda, al igual que aquellas con fases opuestas protegidas de verde líder a la izquierda, los modelos básicos descritos previamente aplican. La dificultad de estos modelos esta en seleccionar los valores de VERD, verd.efc., $verd_f$, $verd_q$ y $verd_u$. La ecuación para $verd_f$ está indexada para el inicio del verde efectivo en la dirección en cuestión, y $verd_q$ esta indexado en el principio del verde efectivo del flujo opuesto. Cuando existen fases de verdes líderes o posteriores o tardíos (ver descripción de fases en párrafos posteriores) o protegidas y permitidas, estas ecuaciones deben ser modificadas para tomar en cuenta cambios en el inicio y en los solapes de varios tiempos verdes.

5. COMPORTAMIENTO DEL FLUJO DISCONTINUO

El comportamiento del tránsito mientras cruza una intersección se ilustra en la figura 9.1. Como se nota en la figura, al momento del semáforo ponerse en verde, la cola comienza a moverse con un intervalo de tiempo entre vehículos que es irregular para los primeros cuatro o cinco vehículos, aproximadamente. Luego, este intervalo se hace mas regular, por lo general de dos segundos, para el resto de los vehículos de la cola que se descarga. La sumatoria de las diferencias entre los intervalos irregulares de los primeros vehículos y los intervalos regulares para el resto de vehículos es el tiempo perdido. El cálculo del tiempo perdido se ilustra con el cuadro 9.14 siguiente.

Figura 9.1 Diagrama de Espacio Tiempo para un Semáforo de Dos Fases



Cuadro 9.14. Intervalos entre Vehículos de una Cola que se Descarga

Vehículos	Intervalo entre Vehículos (I) (seg.)	Intervalo Constante de Saturación (D) (seg)	Tiempo Perdido (k)
0-1	2.8	-	2.8
1-2	2.6	2.0	0.6
2-3	2.2	2.0	0.2
3-4	2.1	2.0	0.1
4-5	2.0	2.0	0
5-6	2.0	2.0	0
Total	13.7	10.0	3.7

En la Figura 9.1 se puede observar que:

El índice del flujo de saturación esta dado por:

$$s = \frac{3600}{D}$$

donde, s = flujo de saturación
 D = Intervalo constante de saturación

El tiempo verde está dado por:

$$VERD = D(X - 1) + L - AMAR .$$

donde, VERD = tiempo de la fase verde
 D = intervalo constante de saturación
 X = número de vehículos en la cola
 L = tiempo perdido
AMAR = tiempo de la fase amarillo

El tiempo verde efectivo que es el tiempo durante la fase que realmente es usado para descargar la cola esta dado por:

$$\text{verd. efect.} = VERD + AMAR. - L$$

El tiempo rojo efectivo es:

$$r = C - \text{verd. efect.}$$

donde, r = rojo efectivo
 C = ciclo

Nótese que el amarillo es usado para la descarga de la cola.

Estudio de Flujo de Saturación

Es importante tener conocimientos del comportamiento del tránsito en intersecciones para los efectos de diseño y análisis. Conocer la tasa de servicio con la cual se descarga una cola de vehículos que espera en un semáforo es de suma importancia. A continuación se describe la metodología del Manual de Capacidad para los estudios de saturación.

- Tomar nota de cuántos vehículos están parados en la cola al inicio de la fase verde.
- Tomar nota de los vehículos pesados en la cola, y de los vehículos que giran.
- Cronometrar el paso de los vehículos que estaban parados en la cola (únicamente) por la intersección, anotando el tiempo que tardaron en pasar los primeros cuatro vehículos, los primeros diez y el tiempo que se tardó la cola completa en pasar.

Los datos mencionados se resumen en el cédula 9.1.

Cédula 9.1. Estudios de Saturación

CEDULA DE ESTUDIO DE SATURACIÓN																		
Ubicación: _____																		
Fecha: _____ Hora: _____ Ciudad: _____ Clima: _____																		
Direccion del Tránsito: _____ Desde: _____ Observadores: _____																		
Movimientos Permitidos: ____ de Frente, ____ a la Derecha, ____ a la Izquierda																		
Veh. en la Cola	Ciclo 1			Ciclo 2			Ciclo 3			Ciclo 4			Ciclo 5			Ciclo 6		
	Tiempo	P	G	Tiempo	P	G	Tiempo	P	G	Tiempo	P	G	Tiempo	P	G	Tiempo	P	G
1																		
2																		
3																		
4																		
5																		
6																		
7																		
8																		
9																		
10																		
11																		
12																		
13																		
14																		
15																		
16																		
17																		
18																		
19																		
20																		
Final de Saturación																		
Final del Verde																		
No. Veh. > 20																		
No. Veh. en Amarillo																		

P = vehículos pesados (con mas de 4 ruedas); G = vehículos que giran (I = izquierda, D = derecha). Los peatones y autobuses que bloqueen la intersección deben ser anotados con el tiempo durante el cual bloquean el tránsito, i.e. PE12 = peatones bloquean el tránsito por 12 segundos; B15 = autobuses bloquean el tránsito por 15 segundos.

Pendiente _____ Tipo de Area _____

Utilizando los datos anotados en el cuadro, el intervalo constante de saturación y el flujo de saturación están dados por:

$$D = \frac{(G_x - G_4)}{X - 4}$$

$$s = \frac{3600}{D}$$

donde, G_x = tiempo que tardan en pasar todos los vehículos que estaban originalmente parados en la cola en segundos.

G_4 = tiempo que tardan en pasar los primeros cuatro vehículos en la cola en segundos.

X = número de vehículos en la cola.

6. MÓDULO DE CAPACIDAD

Variables de Capacidad

(a) Proporción de Flujo para un grupo de Carriles, $(v/s)_i$: Es la proporción de tiempo mínima de verde que necesita el grupo de carriles "i" para mantener condiciones de flujo subsaturadas. La proporción esta dada por:

$$(v/s)_i = \frac{\text{volumen}, v_i}{\text{saturacion}, s_i}$$

(b) Capacidad del Grupo de Carriles, c_i : La capacidad de un grupo de carriles está dada por la multiplicación del flujo de saturación del grupo por la proporción de verde efectivo para ese grupo con respecto al ciclo, tal y como se ilustra en la siguiente ecuación:

$$c_i = s_i \left(\frac{\text{verd.efect.}}{C} \right)$$

(c) Proporción volumen/capacidad, X_i : La proporción de volumen/capacidad para un grupo de carriles esta dada por las siguientes relaciones:

$$X_i = \frac{v_i}{c_i} = \frac{v_i}{s_i \left(\frac{\text{verd.efect.}}{C} \right)}$$

$$X_i = \frac{\left(\frac{v}{s} \right)_i}{\left(\frac{\text{verd.efect.}}{C} \right)_i}$$

(d) Proporción de volumen/capacidad Crítica, X_c : es la proporción de capacidad disponible que está siendo usada por vehículos en los grupos de carriles críticos. Esta proporción esta dada por las siguientes ecuaciones:

$$X_c = \frac{\sum_i \left(\frac{v}{s} \right)_i}{\left(\frac{C-L}{C} \right)}$$

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

En el cuadro siguiente se muestran valores de la relación volumen/capacidad, X , para varias condiciones de tránsito.

Cuadro 9.15. Relaciones Volumen/Capacidad

	Condiciones de Flujo Subsaturado	Condiciones de Flujo Sobresaturado
Grupo de Carriles	$X_i \leq 1.0$	$X_i > 1.0$
Intersección ^a	$X_c \leq 1.0$	$X_c > 1.0$

^a Uno o mas grupos de carriles.

Si la proporción X_c excede 1.0, uno o mas de los grupos de carriles críticos está sobresaturado. Una proporción mayor que 1.0 es una indicación que el diseño de la intersección, la longitud del ciclo o el plan de fases es inadecuado, o las tres cosas son inadecuadas para la demanda que esta siendo analizada. Una proporción menor que 1.0, indica que el diseño, la longitud del ciclo y el plan de fases son adecuados para la demanda de los grupos críticos; asumiendo que los intervalos verdes están proporcionalmente distribuidos. Cuando las fases no son proporcionales, la demanda de algunos movimientos puede exceder su capacidad aun cuando la proporción X_c sea menor a 1.0.

Los grupos de carriles críticos son aquellos que tienen la mayor relación de intensidades en cada fase o conjunto de fases (1). Para el cálculo de la proporción v/c crítica, X_c , los grupos de carriles críticos deben ser identificados. El grupo de carriles críticos controla la cantidad de verde que se le da a cada fase.

La medida normalizada de la intensidad de la demanda en cualquier grupo de carriles está dada por la relación v/s de cada grupo de carriles. Cuando no hay fases solapadas en el diseño de semáforos, como en el caso de semáforos de dos fases, la determinación de los grupos de carriles es directa: en cada fase, el grupo con la relación v/s mas alta es el crítico.

Por lo tanto, cuando las fases no son solapadas:

Capacidad de Intersecciones Semaforizadas

1. Hay un grupo crítico de carriles para cada fase de semáforos
2. En cada fase, el grupo de carriles crítico es el que tiene el mayor v/s de los grupos que se mueven en la fase.
3. Las proporciones v/s críticas se suman para obtener X_c .

Las fases solapadas son mas difíciles de analizar, ya que varios grupos de carriles se pueden mover en varias fases, además de que algunos giros a la izquierda se mueven en fases protegidas y permitidas en varias porciones del ciclo. En esos casos es necesario conseguir el sendero crítico en el ciclo. El sendero que tiene los mas altos v/s es el crítico.

Cuando las fases se solapan, el sendero crítico esta regido por las siguientes reglas:

1. Excluyendo los tiempos perdidos, un grupo crítico de carriles se debe estar moviendo todo el tiempo durante el ciclo.
2. Durante ningún tiempo en el ciclo hay mas de un grupo de carriles crítico moviéndose.
3. El sendero crítico tiene la suma mas alta de v/s.

Con respecto a los tiempos perdidos, se cumple la siguiente regla:

$$L = nt_L$$

donde 'n' es el número de movimientos en el sendero crítico, "L" es el tiempo perdido total y t_L es el tiempo perdido por fase.

7. MÓDULO DE NIVEL DE SERVICIO

Criterios

Los niveles de servicio de intersecciones semaforizadas están dados por el promedio de demoras de tiempo parado por vehículo (ver capítulo VII para la metodología para medir las demoras de tiempo parado en campo). Los criterios para la asignación de los niveles de servicio están dados en el cuadro 9.16 siguiente.

Cuadro 9.16. Criterios para el Nivel de Servicio de Intersecciones Semaforizadas

Nivel de Servicio	Demora de Tiempo Parado por Vehículo (seg)
A	≤ 5.0
B	5.1 a 15.0
C	15.1 a 25.0
D	25.1 a 40.0
E	40.1 a 60.0
F	> 60.0

Cálculo de Demoras

Las demoras promedio de tiempo parado por vehículo en un grupo de carriles está dado por la siguiente ecuación:

$$d = d_1 DF + d_2$$

$$d = 0.38C \frac{\left(1 - \frac{\text{verd.efect.}}{C}\right)^2}{1 - \left(\frac{\text{verd.efect.}}{C}\right) \text{Min}(X,1)} + 173X^2 \left[(X-1) + \sqrt{(X-1)^2 + \left(\frac{mX}{C}\right)} \right]$$

donde, d = demora promedio de tiempo parado por vehículo en el grupo de carriles, en segundos/vehículo

C = longitud del ciclo en segundos

$\text{verd.efect.}/C$ = proporción de verde para el grupo de carriles

X = proporción de volumen/capacidad para el grupo de carriles

c = capacidad para el grupo de carriles

m = término que representa el efecto de los tipos de llegada y el grado de columna

El primer término de la ecuación anterior corresponde a las demoras uniformes. El segundo término a las demoras de incremento. Las demoras calculadas con la fórmula anterior son multiplicadas por un factor de ajuste que depende del tipo de llegadas.

Factor de Ajuste de Demoras, DF

Este ajuste toma en cuenta el impacto del tipo de control y de la calidad de progresión sobre las demoras. Los efectos son mutuamente exclusivos (no pueden ser ambos al mismo tiempo). El cuadro 9.17 muestra el valor apropiado de DF para todos los modos de control posibles. Ya que las ventajas de progresión y de semáforos actuados disminuyen cuando los v/c son bastante altos, se le aplica DF solo al primer término de la ecuación de demoras.

Cuadro 9.17
Factor de Ajuste para Demoras Uniformes (DF)

Factor de Ajuste para tipo de controlador						
Tipo de Controlador	Intersección no Coordinada			Intersección Coordinada		
Tiempo Fijo (grupos de carriles no actuados)	1.0			PF calculado como se muestra a continuación		
Semiactuados:				1.0		
Grupos de carriles actuados	0.85			PF calculado como se muestra		
Grupos de carriles no actuados	0.85			Tratar como semiactuado		
Totalmente actuado	0.85					
Factor de Ajuste de Progresión (PF)						
PF = $(1 - P)f_p / (1 - \text{verd.etc./C})$ ver nota						
Proporción verde verd.etc./C	Tipo de Llegada					
	1	2	3	4	5	6
0.20	1.167	1.007	1.00	1.00 ³	0.833	0.750
0.30	1.286	1.063	1.00	0.986	0.714	0.571
0.40	1.445	1.136	1.00	0.895	0.555	0.333
0.50	1.667	1.240	1.00	0.767	0.333	0.000
0.60	2.001	1.395	1.00	0.576	0.000	0.000
0.70	2.556	1.653	1.00	0.256	0.000	0.000
f_p Prefijados	1.00	0.93	1.00	1.15	1.00	1.00
R_p Prefijados	0.333	0.667	1.00	1.333	1.667	2.00
m término de calibración de demoras incremento	8	12	16	12	8	4

- Notas: 1. La tabulación está basada en los valores de f_p y R_p de prefijados
 2. $P = R_p (\text{verd.etc./C})$ (no debe exceder 1.0)
 3. PF no debe exceder 1.00 para los tipos de llegada de 3 a 6.

donde,

P = proporción de vehículos que llegan durante el verde
 verd.etc./C = proporción de tiempo verde disponible
 f_p = factor de ajuste adicional para cuando las columnas llegan durante el verde.

Los valores de prefijados para f_p son 0.93 para el tipo de llegada 2, 1.15 para el tipo de llegada 4 y 1.0 para todos los demás tipos de llegada.

El valor de P puede ser medido en el campo o estimado según el tipo de llegada. Si se mide en campo, P debe ser determinado como la proporción de vehículos en el ciclo que llega a la línea de pare o se une a la cola (parada o en movimiento) durante la fase verde. PF puede ser determinado de valores de P medidos en campo, usando los valores de f_p de prefijados. El cuadro 9.17 puede ser también usado para determinar PF como una función del tipo de llegada basado en los valores de prefijados para P (ej. $R_p(\text{verd.etc./C})$) y el f_p asociado con cada tipo de llegada. Si PF se calcula con la ecuación que se presenta en el cuadro, es posible que su valor exceda a 1.00 para el tipo de llegada 4 con valores muy bajos de (verd.etc./C) . A PF se le debe asignar un valor máximo de 1.00 para el tipo de llegadas 4. Esto ya se ha tomado en cuenta en el cuadro 9.17.

Los valores apropiados de 'm', el término para la calibración de demoras de incremento, son dados en el cuadro de tipo de llegada como una función del tipo de llegada.

Las demoras en un afluente se calculan con la ecuación siguiente:

$$d_A = \sum_i d_i v_i / \sum_i v_i$$

donde, d_A = demoras para el afluente A, en seg./veh.

d_i = demoras para el grupo de carriles "i" (en el afluente A), en seg./veh

v_i = volumen ajustado para el grupo de carriles "i".

Las demoras en la intersección se calculan con la siguiente ecuación:

$$d_I = \sum_A d_A v_A / \sum_A v_A$$

donde, d_A = demoras promedio por vehículo para la intersección A, en seg./veh

v_A = volumen ajustado para el afluente "A".

Determinación del Nivel de Servicio

El nivel de servicio de la intersección se encuentra directamente relacionado con la demora promedio de tiempo parado. Una vez que se hayan determinado las demoras promedio por afluente, los niveles de servicio se determinan usando el cuadro 9.16 (mostrado con anterioridad).

Procedimiento Especial para Demoras Uniformes con Operación Protegida mas Permitida

Según la ecuación presentada, la demora por vehículo se expresa como la suma de dos términos. El primer término representa las demoras que resultan de las llegadas uniformes durante el ciclo. El segundo término reconoce la tendencia de sobreflujos ocasionales debidos al carácter aleatorio del tránsito.

El primer término se deriva fácilmente como una función del área contenida dentro de la cola almacenada en función del tiempo. Con una sola fase verde por ciclo, la cola en función del tiempo asume una forma triangular; esto es, el tamaño de la cola aumenta linealmente en la fase roja y decrece linealmente en la fase verde. El almacenamiento máximo ocurre al final de la fase roja. La geometría del triángulo depende del volumen de tráfico, la tasa de desalojo de la cola, y la longitud de las fases verde y rojo.

En caso de fases a la izquierda protegidas mas permitidas, este triángulo se hace más complejo. Sin embargo, el área de este polígono es fácil de calcular si se conocen los valores apropiados de las llegadas y los desalojos durante los diversos intervalos del ciclo, al igual que las duraciones de los intervalos. En la discusión a continuación, la fase protegida es la fase primaria y la fase permitida es la fase secundaria.

Las cantidades a continuación deben ser conocidas para evaluar la demora uniforme:

- La tasa de llegadas, q_a (veh/seg), que se asume uniforme a lo largo de todo el ciclo.
- La tasa de flujo de saturación s_p (veh/seg) para la fase primaria.
- La tasa de flujo de saturación s_s (veh/seg) para la porción de la fase secundaria que no esta saturada (cuando la cola opuesta ha desalojado por completo).

- El tiempo verde efectivo para la indicación a la izquierda, $verd_{efc}$ (seg), fase primaria.
- El verde efectivo $verd_q$ (seg) durante la fase secundaria cuando el movimiento recto opuesto bloquea los giros a la izquierda permitidos (este intervalo inicia al principio de la fase verde permitida y continua hasta que la cola de vehículos rectos opuestos se ha desalojado).
- El tiempo verde $verd_u$ (seg) que es disponible para que los giros a la izquierda se filtren a través de las brechas en la corriente de tránsito recto opuesto (este intervalo inicia cuando la cola opuesta de vehículos recto se ha disipado (al final de $verd_q$) y continua hasta el final de la fase verde).
- El tiempo rojo, r (seg) para los giros a la izquierda.

La relación de entradas y salidas que determina la forma y área del polígono se muestra en la figura 9.2. Nótese que el polígono asume cinco formas diferentes dependiendo de la relación de llegadas y salidas. En todos los casos, la tasa de llegadas debe ser ajustada de manera que, para el cálculo de las demoras uniformes, la relación v/c no sea mayor de 1.0. Este ajuste es también necesario para el análisis de operaciones solo protegidas. Si la relación v/c es mayor de 1.0, el área contenida por el polígono no es definida. El efecto de v/c mayor que 1.0 es expresado por el segundo término de la ecuación de demoras.

Es necesario distinguir entre las fases protegido mas permitido (giro a la izquierda líder) y permitido mas protegido (giro a la izquierda posterior o tardío). Tres de los cinco casos mostrados en la Figura 9.3 están asociados con fases de giros a la izquierda líder y las otras dos están asociadas con fases de giro a la izquierda posterior. Los cinco casos se identifican a continuación:

Caso 1: Fase líder a la izquierda: no queda cola al final de la fase protegida o permitida.

Caso 2: Fase líder a la izquierda: queda cola al final de la fase protegida pero no al final de la permitida.

Caso 3: Fase líder a la izquierda: queda cola al final de la fase permitida pero no al final de la fase protegida. Nótese que no es posible tener cola al final de ambas fases si no se permite que la relación v/c exceda 1.00 para los efectos de demoras uniformes.

Caso 4: Fase posterior a la izquierda: no permanece cola al final de la fase permitida. En este caso no habrá cola al final de la fase protegida, ya que la fase protegida viene después de la permitida y servirá a todas las llegadas sin demora.

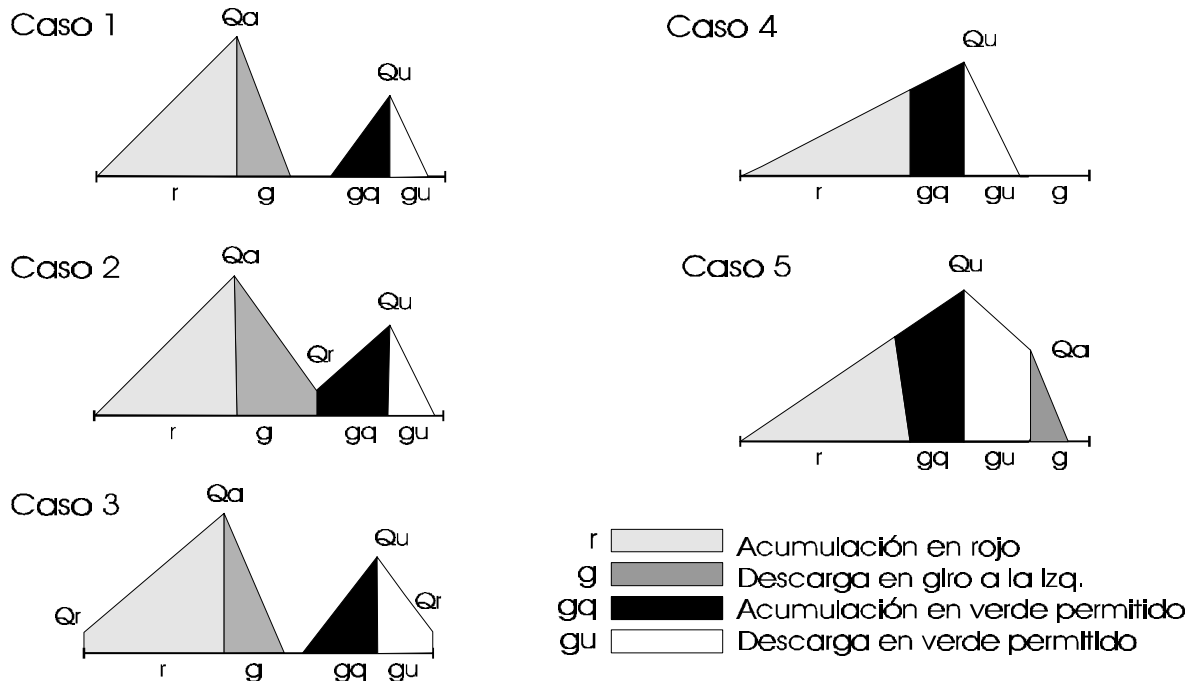
Caso 5: Fase posterior a la izquierda: permanece una cola al final de la fase permitida. Si la relación v/c se mantiene bajo 1.00, toda esta cola será servida en la fase protegida.

Se deben determinar tres longitudes de cola en varios puntos de transición dentro del ciclo. Estos valores se definen como:

- Tamaño de la cola Q_a (veh) al principio de la indicación de la izquierda.
- Tamaño de la cola Q_u (veh) al principio del intervalo no saturado de la fase permitida
- Tamaño de la cola residual Q_r (veh) al final de la fase permitida o protegida.

Los tamaños de las colas determinan la forma del polígono cuya área determina el valor de la demora uniforme.

Figura 9.2. Polígonos de acumulación de colas



Interpretación de los Resultados

Entre los parámetros que afectan a los niveles de servicio se encuentran la calidad de la coordinación de semáforos sucesivos, los tiempos de semáforos (las demoras aumentan con la longitud de ciclo y decrecen con la longitud del tiempo verde efectivo) y, la capacidad de la vía (las demoras disminuyen con la capacidad y aumentan con la proporción volumen/capacidad). El cuadro 9.18 siguiente resume los diagnósticos posibles cuando se conocen las demoras y las proporciones volumen/capacidad para cada uno de los grupos de carriles y para la intersección en general.

Cuadro 9.18 Interpretación de Resultados del Análisis de Capacidad

Proporción Volumen/Capacidad para un grupo de carriles, X_i	Proporción Volumen/Capacidad para la Intersección, X_I	Demoras	Conclusiones
> 1.0	< 1.0	-	Recalcular Tiempos
-	> 1.0	-	Rediseñar la Intersección
Bajo	Bajo	Alto	Recalcular Tiempos; Coordinar Semáforos

ANÁLISIS DE PLANEACION

El análisis operacional presentado anteriormente provee un tratamiento muy detallado de la operación de un semáforo. El nivel de precisión en el análisis a menudo excede la precisión de los datos disponibles. Los requerimientos de una descripción completa de los planes de tiempos de semáforos es una carga posiblemente innecesaria, en particular cuando el método es para ser aplicado en situaciones de planeación de transporte.

Es posible obtener un análisis aproximado del nivel de servicio en un semáforo asumiendo valores para muchos de los datos que se requieren. El cuadro 9.2 contiene los valores de prefijados recomendados para varios datos. Para los propósitos de planeación, los únicos datos de campo requeridos serian los volúmenes, el número de carriles para cada movimiento con una descripción mínima del diseño de los semáforos y otros parámetros de operación.

Requerimientos de Datos

El objetivo del método de planeación es minimizar la necesidad de datos de campo. Para cada afluente es necesario responder las siguientes preguntas:

1. ¿Se permitirá estacionamiento?
2. ¿Será el semáforo coordinado con el semáforo anterior?
3. ¿Cómo se manejan los giros a la izquierda?

En los párrafos que siguen se describen los procedimientos para aplicación, incluyendo una serie de planillas que facilitan los cálculos necesarios para el análisis.

PROCEDIMIENTOS PARA APLICACIÓN

ANÁLISIS OPERACIONAL

El análisis operacional se divide en cinco subanálisis modulares: (a) Módulo de Entrada, (b) Módulo de Ajuste de Volúmenes, (c) Módulo de Tasas de Flujo de Saturación, (d) Módulo de Análisis de Capacidad y (e) Módulo de Nivel de Servicio.

Una visión general del flujo de información entre todas las planillas se presenta en la Figura 9.4, que muestra el tratamiento apropiado para todas las combinaciones de carriles a la izquierda y fases. Un grupo de carriles dado puede tener:

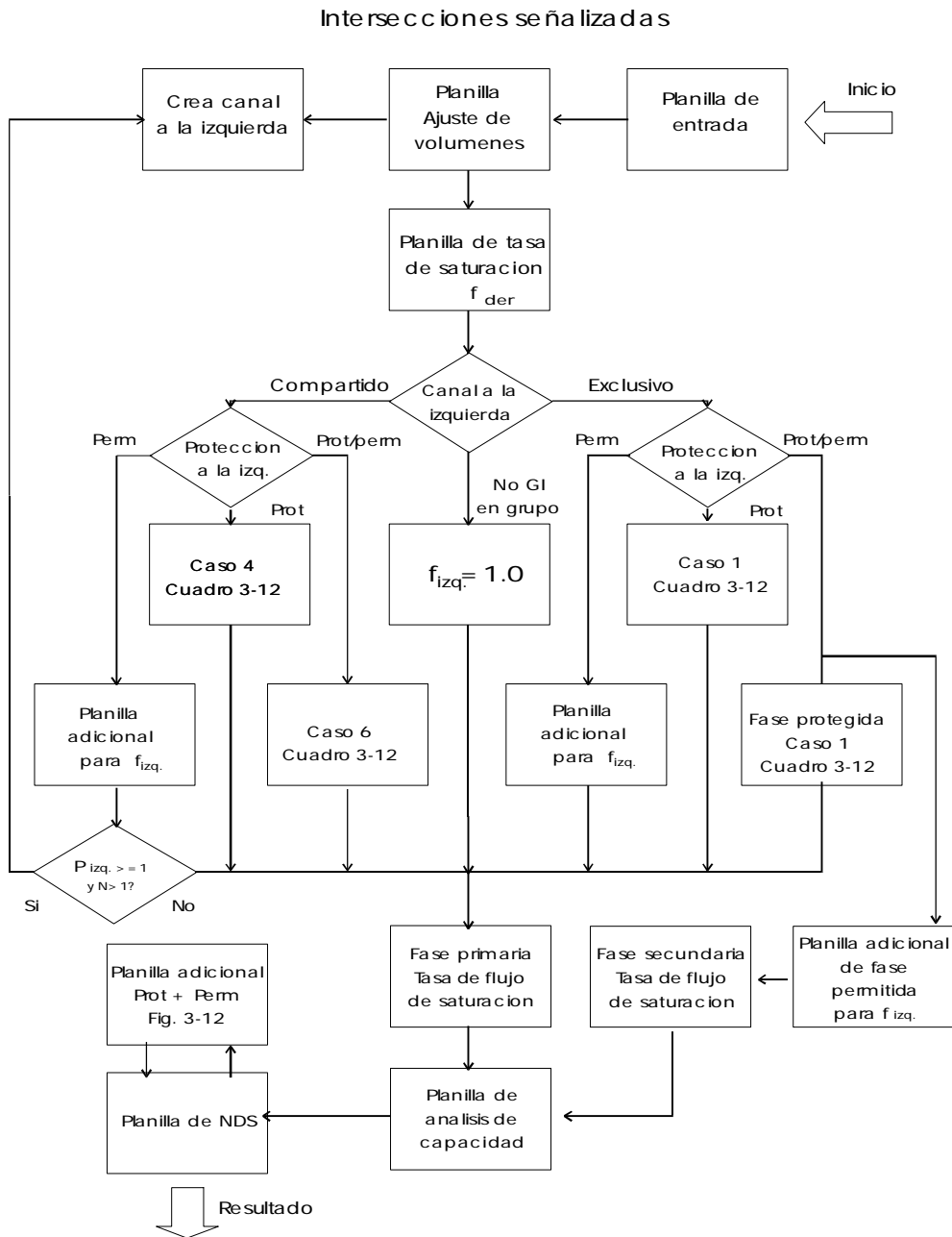
- Giros a la izquierda desde un carril exclusivo
- Giros a la izquierda desde un carril compartido
- Ningún giro a la izquierda

Cuando hay giros a la izquierda, las fases de semáforos pueden proveer

- Operación de giros a la izquierda permitidos
- Operación de giros a la izquierda protegidos
- Una combinación de giros a la izquierda protegidos y permitidos

Por lo tanto, hay siete posibilidades diferentes, cada una de las cuales debe ser manejada de diversas formas usando las planillas que se presentaran a continuación.

Figura 9.4. Diagrama de flujo de las cédulas para el análisis operacional.



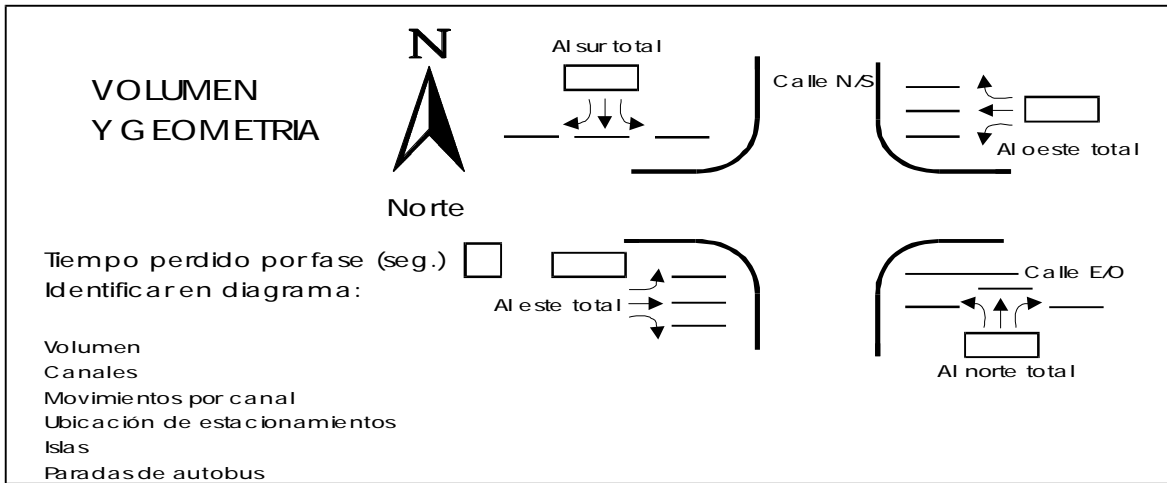
Módulo de Entrada

El módulo de entrada es un resumen de las características geométricas, de tránsito y de semaforización que son necesarias para continuar con los cálculos. La “Planilla del Módulo de Entrada” se muestra en la Figura 9.5.

Capacidad de Intersecciones Semaforizadas

Figura 9.5. Planilla del Módulo de Entradas

PLANILLA DE MÓDULO DE ENTRADA	
Intersección: _____	Fecha: _____
Analista: _____	Periodo Analizado: _____ Tipo de Área: CBD Otro
No. de Proyecto: _____	Ciudad: _____



CONDICIONES DE TRÁNSITO Y DE LA VÍA										
Afluente	Pendiente (%)	% VP	Estacionamiento		Buses N _B	FHMD	Peatones (peat/hr)	Actuación Peat.		Tipo Llegada
			S ó N	N _m				S ó N	Min.	
Al Este										
Al Oeste										
Al Norte										
Al Sur										

Pend. + sube, - baja
 VP: veh. con mas de 4 ruedas
 N_m: maniobras est. por hora

N_B: paradas de bus por hora
 FHMD: factor hora de máxima demanda
 Min. : tiempo mínimo peatones

Tipo de llegadas del 1 al 6

FASES										
D										
I										
A										
G										
R.										
T.	Ver.= A + tr=	Ver.= A + tr=	Ver.= A + tr=	Ver.= A + tr=	Ver.= A + tr=	Ver.= A + tr=	Ver.= A + tr=	Ver.= A + tr=	Ver.= A + tr=	
Actuado?										
Giros Protegidos	_____ /			Giros Permitidos	_____ /			Peatones	_____	Ciclo _____ Seg.

La mitad superior de la planilla contiene el dibujo esquemático de una intersección en el cual se introducen datos básicos de geometría y volúmenes.

Paso 1: Introducir Volúmenes de Tránsito

Para cada movimiento, se introducen los volúmenes de una hora completa en los rectángulos que se muestran en cada esquina del diagrama de la intersección. Giros a la izquierda, recto y a la derecha se introducen en frente a las flechas direccionales respectivas. La suma de los movimientos a la izquierda, recto y a la derecha en cada afluente debe ser igual al valor que se muestra en los rectángulos.

Paso 2: Introducir la Geometría

Detalles de la geometría de los carriles se debe mostrar dentro del diagrama de la intersección. Se debe incluir:

- Número de carriles
- Ancho de carriles
- Movimientos de tránsito que usan cada carril (con flechas)
- Existencia y ubicación de estacionamiento sobre la vía
- Existencia y ubicación de paradas de autobús
- Existencia y longitud de bahías de almacenamiento
- Otros elementos, como es el caso de carrilización, etc.

Paso 3: Introducir las Condiciones de Tránsito y Geométricas

Se introducen los siguientes parámetros en el medio de la planilla. Los datos entran por separado para cada afluente.

1. El porcentaje de pendiente se introduce en la primera columna. Positivo significa subiendo; negativo, bajando.
2. El porcentaje de vehículos pesados se introduce en la segunda columna. Por lo general se utiliza el promedio para el afluente. Cuando hay diferencias significativas entre la proporción de vehículos pesados para cada movimiento, se pueden usar diferentes porcentajes de vehículos pesados para movimientos a la izquierda, rectos y a la derecha. Se define como vehículo pesado, cualquier vehículo que tenga más de 4 ruedas sobre el pavimento.
3. Las columnas tercera y cuarta describen las características de estacionamiento de cada afluente. La tercera columna describe la existencia de estacionamiento en la vía del afluente. La cuarta columna indica el número de maniobras de estacionamiento por hora en el carril dedicado a estacionamiento dentro de 76 metros de la línea de pare.
4. El número de autobuses locales que se detienen cada hora a recoger o dejar pasajeros dentro de 76 mts. de la línea de pare.
5. En la sexta columna se introduce el factor de hora de máxima demanda.
6. Se introduce el número de peatones por hora que usan el paso peatonal y que tienen conflictos con los giros a la derecha del afluente en cuestión.
7. Las columnas octava y novena describen el control para peatones en la intersección. La octava columna indica la existencia de detección de peatones. La novena columna indica el tiempo verde mínimo necesario para los peatones.
8. La décima columna es usada para indicar la calidad de la progresión de semáforos.

En caso de no tener todos los datos disponibles, se pueden usar los valores de prefijados.

Paso 4. Introducir los datos de semaforización

Se hace un diagrama de la secuencia de fases en la parte inferior de la planilla. Se pueden mostrar hasta 8 fases.

1. Para cada fase, se muestran los movimientos permitidos por medio de flechas. Los giros permitidos se muestran con flechas segmentadas y los giros protegidos con flechas continuas. Peatones conflictivos se muestran con líneas segmentadas.
2. Para cada fase, el tiempo verde y el amarillo mas todo rojo se muestra en segundos en la línea de 'Tiempos'.
3. Cada fase debe ser identificada como de tiempo fijo o actuada.

Módulo de Ajuste de Volúmenes

Este módulo se concentra en:

- a) Ajuste de los volúmenes horarios a tasas de flujo para demanda máxima de periodos de 15 minutos dentro de la hora.
- b) Establecimiento de grupos de carriles para el análisis
- c) Ajuste de los flujos de demanda para reflejar la distribución del volumen en los carriles.

La cédula se muestra en la Figura 9.6.

Figura 9.6. Cédula del Módulo de Ajuste de Volúmenes

CEDULA DEL MÓDULO DE AJUSTE DE VOLÚMENES

1. Afluente	2. Movimiento	3. Volumen Mvto. (vph)	4. Factor de Hora De máxima demanda	5. Tasa de Flujo, v_p [3]/[4]	6. Grupo de carriles	7. Tasa de Flujo en grupo de Carriles (v_g)	8. Número de Carriles (N)	9. Factor de Utilización de Carriles (U)	10. Flujo Ajustado v (vph) [7]x[9]	11. Prop. De GI o GD P_{Izq} o P_{der}
Al Este										
Al Oeste										
Al Norte										
Al Sur										

Paso 1: Introducir los Volúmenes Horarios

Los volúmenes horarios se introducen en la columna tres de la planilla. Son tomadas directamente del diagrama de la intersección de la planilla del módulo de entrada.

Paso 2: Convertir volúmenes horarios en tasas de flujo de máxima demanda

En la columna 4 se coloca el factor de hora de máxima demanda (FHMD) para cada movimiento. Los volúmenes horarios se dividen por el factor de hora de máxima demanda para calcular las tasas de flujo de máxima demanda:

$$v_p = \frac{V}{FHP}$$

donde v_p es la tasa de flujo de los 15 minutos de máxima demanda del periodo de análisis. El resultado se coloca en la columna 5 de la planilla.

Paso 3: Establecer los grupos de carriles para el análisis

Se utiliza la metodología descrita anteriormente. Los carriles exclusivos de giro son siempre grupos de carriles separados. Cuando en un afluente existen carriles compartidos por giros a la izquierda y recto, se debe revisar la proporción de giros a la izquierda para determinar si ellos operan como un carril de giro a la izquierda. Si el valor es igual a 1, el carril compartido debe ser considerado un carril a la izquierda exclusivo. La proporción de giros a la izquierda en el carril compartido son determinados posteriormente como parte del módulo de tasas de flujo de saturación.

Los grupos de carriles se muestran en la sexta columna de la planilla por medio de flechas que ilustran los carriles y los movimientos incluidos en los grupos. Los movimientos permitidos se muestran con flechas segmentadas, los movimientos protegidos con flechas sólidas. Cuando un giro tiene fases protegidas y permitidas, se deben incluir los dos tipos de flechas.

Paso 4: Introducir la tasa de flujo para el grupo de carriles

Una vez que el grupo de carriles se ha establecido, las tasas de flujo para los movimientos incluidos en el grupo de carriles se muestran en la columna 7.

Paso 5: Introducir el número de carriles en el grupo

Se introducen en la columna 8.

Paso 6: Introducir el factor de utilización de carril

Si es usado, se puede determinar en campo o en el Cuadro 9.5 mostrado con anterioridad y se introduce en la columna 9.

Capacidad de Intersecciones Semaforizadas

Paso 7: Calcular las tasas de flujo ajustadas para grupos de carriles

Se calcula como:

$$v = v_g U$$

donde 'v' es la tasa de flujo ajustada para el grupo de carriles. El resultado se coloca en la columna 10.

Paso 8: Proporción de giros a la izquierda o derecha en el grupo de carriles

En la columna 11 se introducen las proporciones de giros a la izquierda y derecha para el grupo de carriles. Se denotan como P_{izq} y P_{der} (proporción de giros a la izquierda y derecha, respectivamente) y se expresan como decimales.

Módulo de Tasas de Flujo de Saturación

Se calcula la tasa de flujo de saturación total del grupo de carriles bajo condiciones prevalecientes. La cédula para este módulo se muestra en la Figura 9.7.

Figura 9.7. para el Módulo de Tasas de Saturación

CEDULA DEL MÓDULO DE TASAS DE SATURACIÓN

1. Afluente	2. Mvto. del Grupo de Carriles	3. Flujo de Saturac. Ideal (vphpvc)	4. No. de Carriles N	Factores de Ajuste								13 Flujo de Satur. Ajust. (s) (vphpv)
				5. Ancho Carril f_A Cuadro 9-5	6. Veh. Pesados f_{VP} Cuadro 9-6	7. Pendiente f_p Cuadro 9-7	8. Estac. f_E Cuadro 9-8	9. Bloqueo Autobús f_{aut} Cuadro 9-9	10. Tipo de Área f_a Cuadro 9-10	11. Giro a la Derecha f_{GD} Cuadro 9-11	12. Giro a la Izquier. F_{izq} Cuadro 9-12	
Al Este												
Al Oeste												
Al Norte												
Al Sur												

Paso 1: Introducir la Descripción de los Grupos de Carriles

La columna 2 de la planilla se usa para identificar los carriles y movimientos incluidos en cada grupo. Los mismos de la planilla del módulo de ajuste de volúmenes.

Paso 2: Tasa de flujo de saturación ideal

Se muestra en la columna 3 de la planilla. Para la mayoría de los cálculos, este valor es 1900 vehículos por hora por verde por carril (vphvpc). Las tasas de flujo de saturación se pueden determinar en campo.

Paso 3: Introducir factores de ajuste

La tasa de flujo de saturación ideal es multiplicada por el número de carriles en el grupo y por nueve factores de ajuste. Estos están indicados en la planilla de la columna 5 a la 12. Estos factores son de ajuste por ancho del carril, vehículos pesados, pendiente, estacionamiento, bloqueo de autobuses, factor de tipo de área, factor de giro a la derecha, factor de giro a la izquierda.

Paso 4: Procedimiento Especial para Estimar los Factores de Ajuste para Giros a la Izquierda Permitidos

Las Figuras 9.8 y 9.9 muestran las cédulas que son usadas en los cálculos de los factores de ajuste para giros a la izquierda. Estas planillas se usan para la parte permitida en todos los casos de giros a la izquierda permitidos, incluyendo fases protegidas mas permitidas y solo permitidas, desde carriles compartidos o exclusivos. La Figura 9.8 se usa en casos en los cuales el afluente en cuestión es opuesto a un afluente con más de un carril. La Figura 9.9 se usa cuando el afluente en cuestión es opuesto a un afluente de un solo carril.

Figura 9.8. Planilla adicional para Giros a la Izquierda Permitidos: Afluente de varios carriles

Planilla Adicional para Giros a la Izquierda Permitidos				
Acceso Opuesto por Afluente de Varios Carriles				
Afluente	Al Este	Al Oeste	Al Norte	Al Sur
Longitud del Ciclo, C				
Tiempo Verde Actual para Grupo de Carriles, VERD.				
Tiempo Verde Efectivo para Grupo de Carriles, $ver_{d_{efc}}$				
Tiempo Verde Efectivo para Flujo Opuesto, ver_d				
Número de Carriles en Grupo de Carriles, N				
Número de Carriles Opuestos, N_o				
Tasa de Flujo Ajustada de Giros a la Izquierda, v_{izq}				
Proporción de Giros a la Izquierda en Grupo de Carriles, P_{izq}				
Tasa de Flujo Opuesta Ajustada, v_o				
Tiempo Perdido por Fase, t_p				
Giros a la Izquierda por Ciclo, $IZQC = v_{izq} C / 3600$				
Calcular Flujo Opuesto por Carril, por Ciclo: $v_{ole} = v_o C / (3600 N_o)$				
Determinar la Relación de Columna Opuesta, R_{po} (Cuadro 9-2 o Ecuación)				
Calcular $ver_{d_f}^{**} = VERD \exp(-0.882 IZQC^{0.717}) - t_p$, $ver_{d_f} \leq ver_{d_{efc}}$				
Calcular la Relación de Cola Opuesta: $qr_o = 1 - R_{po} (ver_d / C)$				
Calcular ver_{d_q} usando ecuación, $ver_{d_q} \leq ver_{d_{efc}}$				
Calcular ver_{d_i} : $ver_{d_i} = ver_{d_{efc}} - ver_{d_q}$, si $ver_{d_q} \geq ver_{d_f}$ $ver_{d_i} = ver_{d_{efc}} - ver_{d_f}$, si $ver_{d_q} < ver_{d_f}$				
Calcular $f_s = (875 - 0.625 v_o) / 1000$, $f_s \geq 0$				
Calcular $P_{iz}^* = P_{izq} \{ 1 + [(N - 1) ver_{d_{efc}} / (f_s ver_{d_i} + 4.5)] \}$				
Determine E_{L1} (Figura 9-7)				
Calcular $f_{min} = 2 (1 + P_{iz}) / ver_{d_{efc}}$				
Calcular f_m : $f_m = [ver_{d_f} / ver_{d_{efc}}] + [ver_{d_i} / ver_{d_{efc}}] \{ 1 / [1 + P_{iz} (E_{L1} - 1)] \}$ $min = f_{min}$; $max = 1.00$				
Calcular $f_{IZQ} = [f_m + 0.91 (N-1)/N]^{***}$				

* Si $P_{iz} \geq 1$ para carriles de giro a la izquierda compartidos con $N > 1$, asumir carril de giro a la izquierda de facto y rehacer los cálculos.

** Para el caso especial de un afluente de un solo carril opuesto por un afluente de varios carriles, ver texto.

*** Para giros a la izquierda permitidos, con carriles múltiples exclusivos a la izquierda, $f_{IZQ} = f_m$.

Figura 9.9. Planilla adicional para Giros a la Izquierda Permitidos: Afluente de un solo carril

Planilla Adicional para Giros a la Izquierda Permitidos Acceso Opuesto por Acceso de un Solo Carril				
Afluente	Al Este	Al Oeste	Al Norte	Al Sur
Longitud del Ciclo, C				
Tiempo Verde Actual para Grupo de Carriles, VERD.				
Tiempo Verde Efectivo para Grupo de Carriles, $verd_{efc}$				
Tiempo Verde Efectivo para Flujo Opuesto, $verd_o$				
Número de Carriles en Grupo de Carriles, N				
Tasa de Flujo Ajustada de Giros a la Izquierda, v_{izq}				
Proporción de Giros a la Izquierda en Grupo de Carriles, P_{IZQ}				
Tasa de Flujo Opuesta Ajustada, v_o				
Tiempo Perdido por Fase, t_p				
Giros a la Izquierda por Ciclo, $IZQC = v_{izq} C / 3600$				
Calcular Flujo Opuesto por Carril, por Ciclo: $v_{olc} = v_o C / (3600 N_o)$				
Determinar la Relación de Columna Opuesta, R_{po} (Cuadro 9-2 o Ecuación)				
Calcular $verd_f^{**} = VERD \exp(-0.860 IZQC^{0.629}) - t_p$, $verd_f \leq verd_{efc}$				
Calcular la Relación de Cola Opuesta: $qr_o = 1 - R_{po} (verd_o / C)$				
Calcular $verd_q$: $verd_q = 4.943 v_{olc}^{0.762} qr_o^{1.061} - t_p$ $verd_q \leq verd_{efc}$				
Calcular $verd_i$: $verd_i = verd_{efc} - verd_q$, si $verd_q \geq verd_f$ $verd_i = verd_{efc} - verd_f$, si $verd_q < verd_f$				
Calcular $n = (verd_q - verd_f) / 2$, $n \geq 0$				
Calcular $P_{RECTo} = 1 - P_{IZQo}$				
Determine E_{L1} (Figura 9-7)				
Calcular $E_{L2} = (1 - P_{RECTo}^n) / P_{IZQo}$				
Calcular $f_{min} = 2 (1 + P_{IZQ}) / verd_{efc}$				
Calcular $f_{IZQ}^{**} = f_m = [verd_f / verd_{efc}] + [(verd_q - verd_f) / verd_{efc}] \{ 1 / [1 + P_{IZQ} (E_{L2} - 1)] \} + [verd_i / verd_{efc}] [1 / (1 + P_{IZQ} (E_{L1} - 1))]$ $min = f_{min}$; $max = 1.00$				

** Para el caso especial de un afluente de varios carriles opuesto por un afluente de un solo carril o cuando $verd_f > verd_q$, ver texto.

La metodología básica para cada planilla asume que el afluente en cuestión es de varios carriles si el afluente opuesto es de varios carriles (figura 9.8), y que el afluente en cuestión es de un solo carril si el afluente opuesto es de un solo carril (figura 9.9). Para los casos en los cuales los dos afluentes no sean del mismo tipo, en los casos de fases protegidas mas permitidas y en fases en las cuales los movimientos opuestos rectos tengan fases líder, las planillas se pueden usar aun, pero usando la metodología anteriormente descrita.

Hay una cédula para cada afluente en las planillas, a pesar que sólo se incluyen aquellos afluentes donde haya giros a la izquierda permitidos. Las primeras entradas se refieren a datos que se pueden tomar de otras planillas:

1. La longitud del ciclo.
2. El tiempo verde para la fase permitida. Si esta fase forma parte de una fase permitida mas protegida o el afluente opuesto tiene una fase líder, usar las instrucciones descritas en la "Metodología".
3. Se introduce el tiempo verde efectivo para la fase permitida. Si esta fase forma parte de una fase permitida mas protegida o el afluente opuesto tiene una fase líder, usar las instrucciones descritas en la "Metodología".

4. Se introduce el tiempo verde de la fase permitida del afluente opuesto. Si la fase es permitida mas protegida, las recomendaciones anteriores aplican.
5. El número de carriles para el grupo de carriles en cuestión. Si los giros a la izquierda son opuestos por un afluente de carriles múltiples (Figura 9.9), se introduce el número de carriles opuestos. Si los giros a la izquierda y derecha se hacen en carriles exclusivos, entonces estos no se incluyen en el número de carriles opuestos.
6. La tasa de flujo ajustada para giros a la izquierda.
7. La proporción de giros a la izquierda en el grupo de carriles. Cuando se trata de un grupo de giros a la izquierda, $P_{izq} = 1.00$. Si los giros a la izquierda están opuestos por afluentes de un solo carril (Figura 9.9), la proporción de giros a la izquierda en el flujo opuesto se toma en cuenta.
8. La tasa de flujo opuesto ajustado. Si hay giros a la izquierda y derecha que se hagan de carriles exclusivos en el afluente opuesto, no se incluyen en la tasa.
9. El tiempo perdido por fase.

Las ecuaciones que se usan en los cálculos que siguen se muestran en las filas de las planillas; estas ecuaciones usan los datos discutidos anteriormente. Algunos de los cálculos necesitan explicaciones:

- La razón de la columna opuesta, R_{po} , se puede determinar de dos formas diferentes. Si aparece el tipo de llegada para el tránsito del afluente opuesto, se utiliza la razón de columna prefijados del cuadro de tipos de llegada. Si se tienen datos sobre la proporción de llegadas en verde es conocida, se usa la ecuación basada en las relaciones $verd.f/ciclo$.
- La ecuación para $verd_f$ que se muestra en la Figura 9.8 asume que el afluente en cuestión es un afluente con varios carriles, al igual que el afluente opuesto. Si el afluente en cuestión es un afluente de un solo carril, la ecuación para $verd_f$ de la Figura 9.9, que asume afluentes de un solo carril, debe ser usada. Si el afluente en cuestión es un afluente de varios carriles, la ecuación para $verd_f$ de la Figura 9.8, que asume afluentes de varios carriles, debe ser usada. En cada caso, si el grupo de carriles es en un carril exclusivo de giro a la izquierda, entonces $verd_f = 0.00$.
- Para grupos de varios carriles (Figura 9.8), P_L se calcula como la proporción de giros a la izquierda en el carril mas izquierdo del grupo de carriles. Si este número alcanza a '1', se convierte en un carril de giro a la izquierda "de facto", ya que es ocupado completamente por vehículos que giran a la izquierda. Esto requiere que se hagan los cálculos para este afluente otra vez. Si un grupo de carriles de varios carriles es opuesto a un afluente de un solo carril, se debe usar la Figura 9.9, pero el valor de P_L debe ser estimado y sustituido por P_{IzQ} , como descrito anteriormente.
- La figura 9.13 a es usada para determinar el valor de E_{L1} basado en la tasa de flujo opuesto, las fases de semáforo del acceso en cuestión, el tipo de carril de giro a la izquierda y el número de carriles opuestos. Para un acceso de un solo carril (Figura 9.9), E_{L2} se calcula por una fórmula y no por la Figura 9.13.
- El valor de f_m se calcula como mostrado. El valor máximo es '1.0' y el mínimo es $2(1+P_L)/g$. Estos límites son usados si el valor calculado cae fuera de este rango.
- El factor de ajuste de giro a la izquierda, f_{izq} , se calcula como mostrado. Para un grupo de un solo carril, $f_{izq} = f_m$. Si un grupo de varios carriles es opuesto por un afluente de un solo carril, se usa la Figura 9.9, pero f_{LT} se calcula en base a f_m y el número de carriles como se muestra en la Figura 9.8, excepto cuando el grupo de carriles en cuestión contiene carriles de giro a la izquierda múltiples.

Paso 5: Cálculo de las Tasas de Flujo de Saturación Ajustadas

Las tasas ajustadas de flujos de saturación se calculan multiplicando al tasa de flujo de saturación ideal por el número de carriles en cada grupo de carriles y por cada uno de los nueve factores de ajuste determinados en el Paso 3. Esto se hace de acuerdo con la ecuación:

$$s = s_0 \times N \times f_A \times f_{VH} \times f_p \times f_e \times f_{aut} \times f_a \times f_{DER} \times f_{IZQ}$$

Módulo de Análisis de Capacidad

En el Módulo de Análisis de Capacidad, los resultados de los cálculos de los tres módulos anteriores se combinan para calcular la capacidad de cada grupo de carriles y las tasas v/c para cada grupo de carriles y para la intersección en general. En la Figura 9.10 se muestra una cédula que se usa para los cálculos de capacidad.

Figura 9.10. Cédula para el módulo de Análisis de Capacidad

CEDULA PARA EL MÓDULO DE ANÁLISIS DE CAPACIDAD

1 Movt. en Grupos de Carriles	2 Tipo de Fase (F, S, A)	3 Tasa de Flujo Ajustada (v)	4 Tasa de Satur. Ajust. (s)	5 Relación de Flujo, v/s [3]/[4]	6 Relación de verde verde/C	7 ¹ Capacidad Grupo de Carriles (c) [4]x[6]	8 Relac. v/c (X) para grupo de carr. [3]/[7]	9 Grupo de Carriles Crítico

¹ Los giros a la izquierda permitidos están sujetos a una capacidad mínima de $(1+P_{Iz})(3600/C)$ en la Columna 7.

Longitud de Ciclo, C _____ seg.
 Tiempo perdido por ciclo, T_p _____ seg.
 $Y = \text{Sum } (v/s)_{ci} = \text{_____}$ $X_C = Y \times C / (C - T_p) = \text{_____}$

Paso 1: Descripción del Grupo de Carriles

La columna 1 de la planilla es para la descripción del grupo de carriles. Los carriles y los movimientos incluidos en cada grupo de carriles se introducen tal y como se hizo en las planillas del módulo de tasas de flujo de saturación.

Paso 2: Tipo de Fases

La columna 2, Tipo de Fases, esta incluida para tomar en cuenta los carriles exclusivos de giro a la izquierda que tienen fases protegidas y permitidas. En estos casos, la fase protegida será la fase primaria y la fase permitida la secundaria. Las fases primarias y secundarias deben ser representadas por entradas separadas (líneas separadas) en esta cédula, y ciertas cantidades, como la capacidad del grupo de carriles, deben ser calculadas como la suma de los valores primarios y secundarios. Las entradas de fases primarias deben ser designadas como "P" en esta columna. Las entradas de fases secundarias deben ser designadas como "S", y la fila que contiene los valores totales debe ser designada como "T". Nótese que los grupos de carriles con carriles compartidos de giro a la izquierda tienen solo una fase primaria, al igual que los grupos con fases solo protegido y solo permitido.

Paso 3: Tasas de Flujo Ajustadas para cada grupo de carriles

La tasa de flujo ajustada para cada grupo de carriles se obtiene de la Planilla de Ajustes de Volúmenes y se introduce en la columna 3 de la cédula. En el caso de grupos de carriles con ambas fases primarias y secundarias, la tasa de flujo para el grupo de carriles debe ser introducida en una fila identificada con la letra "T" en la columna 2. Para el cómputo de la tasa crítica v/c , X_c , es necesario proporcionar la tasa de flujo total entre las fases primarias y secundarias. Como indicado anteriormente, se considera que cualquier fase que venga primero esta saturada por tránsito que gira a la izquierda y aplicar el flujo que queda a la fase que viene después.

Paso 4: Tasas de Flujo ajustadas de saturación para cada grupo de carriles

Esta tasa se obtiene directamente de la cédula de Flujos de Saturación y se introduce en la columna 4. No es necesario introducir un valor de tasa de saturación en la fila T cuando hay una fase secundaria, ya que este valor no tendría significado.

Paso 5: Razón de Flujo (v/s) para cada grupo de carriles.

La razón de flujo para cada grupo de carriles se calcula como v/s y se introduce en la columna 5 de la planilla. Esto se debe hacer para filas que representen fases primarias y secundarias, pero no para filas que representen el total.

Paso 6: Razón de verde para cada grupo de carriles

La razón $verd_{efc}/C$ para cada grupo de carriles, el verde efectivo entre la longitud del ciclo, se calcula y se introduce en la columna 6 de la planilla. Los tiempos verdes actuales y las longitudes de ciclo se obtienen de la planilla de entrada de datos.

Paso 7: Cálculo de la Capacidad para cada grupo de carriles

La capacidad para cada grupo de carriles se calcula de la siguiente ecuación, como la tasa de flujo de saturación por la razón de verde:

$$c_i = s_i \left(\frac{\text{verd.efect.}}{C} \right)$$

El resultado se introduce en la columna 7 de la planilla. Los valores deben ser calculados para las fases primarias y secundarias, y la suma de los valores para cada fase deben ser introducidos en una fila designada con la letra "T" en la columna 2.

En los Estados Unidos, se impone un valor mínimo de la capacidad basado en dos 'sneakers' por ciclo, para todos los movimientos a la izquierda permitidos. Este valor se puede calcular como:

$$\frac{3600(1 + P_L)}{C}$$

Paso 8: Cálculo de las razones v/c para cada grupo de carriles

La razón v/c para cada grupo es la razón del flujo ajustado con respecto a la capacidad:

$$X_i = \frac{v_i}{c_i}$$

Estos valores se introducen en la columna 8 de la planilla.

Paso 9: Identificación de los Grupos de Carriles Críticos

A este punto en los cálculos, se determinan los grupos de carriles críticos y los tiempos perdidos por ciclo de acuerdo a las metodología discutidas anteriormente. Se define como un grupo de carriles crítico al grupo con la relación v/s más alta en cada fase o conjunto de fases. Cuando existe un solape de fases, se deben analizar todas las combinaciones posibles de grupos de carriles crítico hasta determinar la combinación mas crítica, tal y como discutido anteriormente. Los grupos de carriles críticos se identifican con una marca en la columna 9 de la cédula. El tiempo perdido por ciclo se introduce como el valor 'L' en el espacio en la parte inferior de la planilla.

Cálculo de las relaciones críticas v/c

Las relaciones v/s para los carriles críticos se suman. El resultado se introduce como el valor 'Y' en la parte inferior de la planilla. El valor crítico v/c, X_c , indica el grado de saturación asociado con la geometría, volúmenes y fases de semáforos y se calcula con la siguiente ecuación:

$$X_c = Y \left(\frac{C}{C - L} \right)$$

El resultado se introduce en la casilla al final de la planilla. Al completar esta planilla, se definen las características de capacidad de la intersección. Al respecto, se resumen algunos puntos:

1. Una relación v/c crítica de más de 1.0 indica que el diseño de semaforización y geométrico no pueden satisfacer la combinación de movimientos críticos en la intersección. La demanda actual o proyectada de estos movimientos excede la capacidad de la intersección. Las condiciones se pueden mejorar de la siguiente forma: aumentar el ciclo, cambios en el plan de fases y cambios básicos en la geometría. Nótese, sin embargo, que los cálculos deben llevarse a cabo usando volúmenes de llegada. Cuando las relaciones v/c son menores de 1.00, los volúmenes de entrada y salida son los mismos. Cuando las relaciones v/c son mayores de 1.00, quiere decir que para una fase o para toda la intersección, los volúmenes de salida son menores a los volúmenes de llegada. Volúmenes futuros son también volúmenes de llegadas. Cuando en el análisis se usan volúmenes actuales de salida, el v/c actual no puede ser mayor de 1.00. Los volúmenes observados en campo no pueden exceder la capacidad. Si ese es el caso, debe haber algún error. Si valores de $v/c > 1$ persisten, es una indicación que la intersección opera mas eficientemente que lo anticipado por estas técnicas.
2. Cuando el valor crítico v/c es aceptable pero los valores de los v/c para los grupos críticos varia considerablemente, se debe reexaminar la distribución de los tiempos verdes, ya que esto indica una distribución desproporcionada de los verdes.
3. Si los giros a la izquierda permitidos resultan en una reducción extrema de los flujos de saturación, se debe considerar el uso de fases protegidas.
4. Si la relación crítica v/c , X_c , es mayor que 1.00, es muy probable que ni la geometría ni la semaforización puedan satisfacer la demanda. Se deben considerar cambios en ambos.
5. Cuando los v/c no son aceptable y en el plan de fases se protegen varios giros, es probable que se requieran cambios en la geometría para mejorar la situación.

Módulo de Nivel de Servicio

El módulo de niveles de servicio combina los resultados de los módulos de ajuste de volúmenes, flujos de saturación y análisis de capacidad para determinar la demora de tiempo promedio por vehículo en cada grupo de carriles. El nivel de servicio se relaciona directamente y se consigue en la tablas. La cédula para este módulo se ilustra en a Figura 9.11.

Figura 9.11. Planilla para el Módulo de Nivel de Servicio

PLANILLA PARA EL MÓDULO DE NIVEL DE SERVICIO

Ciclo ___ seg.		1 ^{er} Término de Demoras			2 ^o Término de Demoras			Grupo de Carriles		Afluente	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Movs. en grupo de Carriles	v/c X	verd _{efc} / C	Demora Uniforme d ₁ (seg/veh)								
Al Este											
Al Oest											
Al Nort.											
Al Sur											

Las demoras se calculan con las ecuaciones anteriormente discutidas. Estas se repiten a continuación por conveniencia:

$$d = d_1 DF + d_2$$

$$d = 0.38C \frac{\left(1 - \frac{\text{verd. efect.}}{C}\right)^2}{1 - \left(\frac{\text{verd. efect.}}{C}\right) \text{Min}(X,1)} + 173X^2 \left[(X-1) + \sqrt{(X-1)^2 + \left(\frac{mX}{C}\right)} \right]$$

La cédula esta diseñada para que los términos de demora uniforme e incremental se calculen separadamente. Las demoras uniformes se multiplican por el factor de ajustes de demoras (DF) para tomar en cuenta el impacto de la progresión y el tipo de control. Los valores de 'DF' y 'm' se obtienen del cuadro 9.17.

Paso 1: Descripción de Grupos de Carriles

Como en las otras planillas, la columna 1 esta reservada para los carriles y los movimientos incluidos en el grupo de carriles. La descripción será la misma que la mostrada en la planilla de ajuste de volúmenes.

Paso 2: Demoras Uniformes

El primer término de la ecuación de demoras toma en cuenta las demoras uniformes, que es la demora de un grupo de carriles que resultaría si las llegadas fueran uniformes y los ciclos no experimentaran sobresaturación. Depende de la relación v/c (X) para el grupo de carriles, la relación verde_{efc}/ciclo para el grupo de carriles y la longitud del ciclo (C), que se introduce en la parte superior de la planilla.

Paso 3: Determinar los ajustes de las demoras

Al factor de ajustes de demoras, DF, tal como se indica en el cuadro 9.17, se le asigna un valor de 0.85, 1.0, o el valor del factor de ajuste de la progresión, PF. El valor de PF se obtiene del cuadro 9-13 como una función del tipo de llegada y la relación verde_{efc}/C para grupos de carriles con fases coordinadas y no actuadas (control de tiempo fijo o semiactuado). Si en vez del tipo de llegadas se usa el valor de 'P' (proporción de vehículos que llegan durante el verde), 'PF' se puede calcular como:

$$PF = \frac{(1-P)f_p}{1 - \left(\frac{\text{verde}_{efc}}{C} \right)}$$

donde $f_p = 0.93$ para el tipo de llegada 2, 1.15 para el tipo de llegada 4 y 1.0 para todos los otros tipos.

Ya que $f_p > 1$ para el tipo de llegada 4, es posible calcular un valor de PF mayor que 1.0 usando la ecuación anterior cuando la relación verde_{efc}/C es muy baja. Ya que el tipo de llegada 4 indica la existencia de progresión favorable, el valor de PF debe ser reducido a 1. bajo esta condición.

El valor de DF se introduce en la columna 5 de la cédula.

Paso 4: Demora de Incremento (debido a llegadas aleatorias)

El segundo término de la ecuación de demoras toma en cuenta las demoras debidas a llegadas aleatorias y a fallas de ciclo. Esta basado en la relación v/c (X) y la capacidad (c) para el grupo de carriles. Estas demoras se determinan de la siguiente forma:

1. Introducir la capacidad del grupo de carriles en la columna 6 de la planilla.
2. Determinar el factor de calibración de la demora aleatoria (m) del cuadro 9.17. este valor es una función del tipo de llegada. Si en la determinación de el factor PF se utiliza un valor

estimado o medido en campo de P, entonces el tipo de llegada puede ser determinado del cuadro de razón de columnas. En este caso, la relación de columnas o pelotones, R_p , debe ser estimada como:

$$R_p = \frac{PC}{verd_{efc}}$$

El valor de 'm' se introduce en la columna 7 de la planilla.

3. Calcular el segundo término de la demora. El resultado se coloca en la columna 8 de la planilla.

Paso 5: Demoras y Nivel de Servicio para cada Grupo de Carriles

Las demoras y nivel de servicio se consiguen multiplicando la demora uniforme por el factor de ajuste de demora uniforme y sumando el resultado a la demora aleatoria, de acuerdo con la ecuación de demoras. El resultado se coloca en la columna 9 de la planilla. El nivel de servicio correspondiente a esta demora, tomada del cuadro 9.16, se coloca en la columna 10.

Paso 6: Demoras y Nivel de Servicio para cada Afluente

Para determinar la demora promedio por vehículo se calcula el promedio ponderado de las demoras para cada afluente: se multiplican las demoras de cada grupo de carriles por su volumen respectivo, se suma el total para el afluente y se divide por el volumen total del afluente. Este promedio ponderado se coloca en la columna 11 para cada afluente. El nivel de servicio se determina del cuadro 9.16 y se introduce en la columna 12.

Paso 7: Demora y Nivel de Servicio para la Intersección

Se calcula el promedio ponderado de las demoras para los afluentes. El nivel de servicio se determina del cuadro 9.16.

A continuación se indican situaciones que son comunes:

1. El nivel de servicio es una indicación de la aceptación de las demoras por parte de los conductores. Es una condición muy subjetiva: lo que es aceptable en una ciudad grande y densa no lo es en zonas rurales o de baja densidad.
2. Cuando los niveles de demora son aceptables para la intersección pero inaceptables para algunos grupos de carriles, se debe revisar el plan de fases o la distribución de los verdes o ambos para hacer la operación mas eficiente.
3. Cuando los niveles de demora son inaceptables, pero las relaciones v/c son bajas, entonces la longitud del ciclo puede que sea muy larga, el plan de fases ineficiente, o ambas cosas. Sin embargo, es importante notar que cuando el semáforo en cuestión pertenece a un sistema, la longitud del ciclo está determinada por las necesidades del sistema y, variaciones del ciclo de una intersección en particular puede que no resulte práctico.

4. Cuando ambos, los niveles de demora y las relaciones v/c son inaceptables, entonces la situación es crítica. En esos casos se deben considerar cambios en la geometría y en las fases de los semáforos.

Cédula Adicional para Demoras Uniformes

Cuando los giros a la izquierda de carriles exclusivos se llevan a cabo en las fases permitidas y protegidas en la secuencia de semáforos, las demoras uniformes se determinan como un caso especial. La fase protegida se identifica como la fase primaria y, la fase permitida como la fase secundaria. La planilla se presenta en la figura 9.12. Los valores requeridos se pueden obtener de otras planillas. Se deben obtener también los siguientes intervalos de semáforos de cálculos previos:

1. Fase verde primaria, ' $verd_{efc}$ ', del Módulo de Análisis de Capacidad (Figura 9.10).
2. Intervalos de fase verde secundaria, $verd_q$ y $verd_u$, de las planillas adicionales para giros a la izquierda permitidos.
3. Tiempo rojo (en segundos), r , calculada como $C - (verd_{efc} + verd_q + verd_u)$, donde C es la longitud del ciclo en segundos.

Estos valores se colocan en las líneas apropiadas de la planilla. Nótese que cuando los volúmenes de tránsito son muy pesados, $verd_u$, se reduce a cero, y esto significa que la capacidad del giro a la izquierda es la dada por los 'sneakers'. El efecto de los 'sneakers' se aproxima en el Módulo de Flujos de Saturación (Figura 9.7) imponiendo un límite mínimo al valor de f_{izq} ; debido a este límite mínimo, se le debe imponer un límite mínimo también a $verd_u$, para ser colocado en la planilla. El tiempo necesario debe ser transferido de $verd_q$ a $verd_u$ para asegurar que el valor de $verd_u$ no sea menor a 4 segundos.

Los cálculos de las demoras comienzan con la determinación de las tasas de las llegadas y salidas en unidades de vehículos por segundo, a manera de tener compatibilidad con los cálculos que siguen en la planilla. La tasa de llegadas es la división del volumen de giro a la izquierda entre 3600. Este valor debe ser ajustado para asegurar que, para los efectos de demoras uniformes, las llegadas no excedan la capacidad de la intersección. Si la relación v/c, X , excede 1.0, la tasa de llegadas debe ser dividida por X , tal y como se indica en la planilla.

Se deben determinar dos tasas de salidas:

1. La tasa de salida de la fase primaria, $s_p = s/3600$, donde s se obtiene del módulo de análisis de capacidad (Figura 9.10).
2. La tasa de salida de la fase secundaria, s_s , que se calcula de la siguiente forma:

$$s_s = s \frac{verd_q + verd_u}{verd_u \times 3600}$$

donde s es la tasa del flujo de saturación ajustado para la fase secundaria del Módulo de Análisis de Capacidad (Figura 9.10) y los otros valores han sido determinados.

Cuando $verdu$ es muy corto, las salidas durante la fase secundaria serán en su mayoría 'sneakers'. Ya que los 'sneakers' se mueven con intervalos de saturación muy pequeños, es posible tener valores muy altos de s_s . Por factores prácticos, el valor de s_s por carril no debe exceder la tasa de saturación ideal para el grupo de carriles dividida entre 3600.

Las relaciones v/c para las fases primarias y secundarias, X_{prot} y X_{perm} , deben ser determinadas por las ecuaciones dadas en la planilla.

ANÁLISIS DE PLANEACIÓN

Este análisis es para dimensionar la intersección o para determinar la suficiencia de la capacidad de la intersección para fines de planeación. Esta basado en la suma de volúmenes críticos y requiere un mínimo de información (geometría y volúmenes). Se proveen tres cédulas para este análisis (Figuras 9.13, 9.14 y 9.15).

Figura 9.13. Planilla de Entrada para Método de Planeación

CÉDULA DE MÓDULO DE ENTRADA																																														
Intersección: _____		Fecha: _____																																												
Analista: _____		Periodo Analizado: _____																																												
No. de Proyecto: _____		Ciudad: _____																																												
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 30%;"> <p>VOLUMEN Y GEOMETRIA</p> <p>Tiempo perdido por fase (seg.) <input type="checkbox"/></p> <p>Identificar en diagrama:</p> <ul style="list-style-type: none"> Volumen Canales Movimientos por canal Ubicación de estacionamientos Islas Paradas de autobus </div> <div style="width: 65%; text-align: center;"> </div> </div>																																														
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 30%;">DATOS DEL ACCESO</th> <th style="width: 10%;">Al Norte</th> <th style="width: 10%;">Al Sur</th> <th style="width: 10%;">Al Este</th> <th style="width: 10%;">Al Oeste</th> <th style="width: 30%;">Tipo de Área</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Estacionamiento Permitido</td> <td><input type="text"/></td> <td><input type="text"/></td> <td><input type="text"/></td> <td><input type="text"/></td> <td>CBD _____</td> </tr> <tr> <td>Coordinación</td> <td><input type="text"/></td> <td><input type="text"/></td> <td><input type="text"/></td> <td><input type="text"/></td> <td>Otro _____</td> </tr> <tr> <td>Tratamiento del Giro a la Izquierda</td> <td><input type="text"/></td> <td><input type="text"/></td> <td><input type="text"/></td> <td><input type="text"/></td> <td>FHMD _____</td> </tr> <tr> <td> Permitido</td> <td><input type="text"/></td> <td><input type="text"/></td> <td><input type="text"/></td> <td><input type="text"/></td> <td>Longitud de Ciclo _____</td> </tr> <tr> <td> Protegido</td> <td><input type="text"/></td> <td><input type="text"/></td> <td><input type="text"/></td> <td><input type="text"/></td> <td> Mínimo _____</td> </tr> <tr> <td> No tiene flujo opuesto</td> <td><input type="text"/></td> <td><input type="text"/></td> <td><input type="text"/></td> <td><input type="text"/></td> <td> Máximo _____</td> </tr> </tbody> </table>					DATOS DEL ACCESO	Al Norte	Al Sur	Al Este	Al Oeste	Tipo de Área	Estacionamiento Permitido	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	CBD _____	Coordinación	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	Otro _____	Tratamiento del Giro a la Izquierda	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	FHMD _____	Permitido	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	Longitud de Ciclo _____	Protegido	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	Mínimo _____	No tiene flujo opuesto	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	Máximo _____
DATOS DEL ACCESO	Al Norte	Al Sur	Al Este	Al Oeste	Tipo de Área																																									
Estacionamiento Permitido	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	CBD _____																																									
Coordinación	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	Otro _____																																									
Tratamiento del Giro a la Izquierda	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	FHMD _____																																									
Permitido	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	Longitud de Ciclo _____																																									
Protegido	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	Mínimo _____																																									
No tiene flujo opuesto	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	Máximo _____																																									

Capacidad de Intersecciones Semaforizadas

Figura 9.14. Cédula de Volúmenes por carril para Método de Planeación

Ubicación: _____		Dirección: _____	
Movimiento a la Izquierda		Movimiento a la Derecha	
		Carril Exclusivo a la Derecha	Carril Compartido a la Derecha
1. Volumen Izquierda _____		6. Volumen a la Derecha _____	_____
2. Volumen Opuesto Principal _____		7. Carriles a la Derecha _____	1
3. No. Carriles Exclusivos a la Izquierda _____		8. Factor de Ajuste Derecha _____	_____
4. Factor de Ajuste a la izquierda _____ (ver instrucciones)		Vol. en Carril a la Derecha: [9] _____	[10] _____
Producto de: [2] * [1] _____ ----->		Permitido	Protegido
5. Volumen en Carril a la Izquierda: [1] / ([3] * [4]) _____	0	_____	No Opuesto

Movimiento de Frente			
11. Volumen de Frente _____	_____	_____	_____
12. Factor de Ajuste por Estacionamiento _____	_____	_____	_____
13. No. carriles de frente incluyendo compartidos _____	_____	_____	_____
Computo para Carriles a la Izquierda Exclusivos			
14. Volumen Total en Afluente: ([10] + [11] / [12]) _____	_____	_____	_____
16. Equivalente de Giro a la Izquierda: (Figura 3.4a) _____	_____	XXXXXXXXXX	XXXXXXXXXX
18. Volumen en Carril de Frente: [14] / [13] _____	_____	_____	_____
19. Volumen en carril crítico: (ver instrucciones) _____	_____	_____	_____
Cómputos para Carriles a la Izquierda Compartidos			
14. Volumen Total del Afluente: (ver instrucciones) _____	_____	_____	_____
15. Proporción de giros a la izquierda en el grupo de carriles _____	_____	XXXXXXXXXX	XXXXXXXXXX
16. Equivalente de Giro a la Izquierda: (Figura 3.4a) _____	_____	XXXXXXXXXX	XXXXXXXXXX
17. Factor de ajuste para Giros a la Izquierda: (Cuadro 3.19) _____	_____	_____	1.0
18. Volumen en Carril de Frente: [14] / ([13] * [17]) _____	_____	_____	_____
19. Volumen en Carril Crítico: Max [9], [18] _____	_____	_____	_____
Chequeo de Giros a la Izquierda (si [16] > 8)			
20. Capacidad de Giros a la Izq. Permitidos (por "sneakers"): _____	7200 / C _{max} _____	XXXXXXXXXX	XXXXXXXXXX

Figura 9.15. Planilla de Operación de Semáforos, Método de Planeación.

Selección de Plan de Fases, Planilla de Volúmenes por Carril		AI Este	AI Oeste	AI Norte	AI Sur
Volumen Crítico por Carril, Frente y Derecha: [19]		_____	_____	_____	_____
Volumen de Carril a la Izquierda: [5]		_____	_____	_____	_____
Protección de Giros a la Izquierda: (Perm., Prot., N/O)		_____	_____	_____	_____
Giro a la Izquierda Dominante: (Indicar con *)		_____	_____	_____	_____
Criterio de Selección basado en el tratamiento especificado para los giros a la izquierda:	Plan 1:	Perm.	Perm.	Perm.	Perm.
		Perm.	N/O	Perm.	N/O
		N/O	Perm.	N/O	Perm.
	Plan 2a:	Perm.	Prot.	Perm.	Prot.
	Plan 2b:	Prot.	Perm.	Prot.	Perm.
	Plan 3a:	*Prot.	Prot.	*Prot.	Prot.
	Plan 3b:	Prot.	*Prot.	Prot.	*Prot.
	Plan 4:	N/O	N/O	N/O	N/O
Plan de Fases Seleccionado (1 a 4)					
Ciclo Mínimo [C _{min}]	_____	Ciclo Máximo [C _{max}]	_____	[FHMD]	(Planilla de Entradas)

Plan de Fases de Cuadro 3.20		Este - Oeste			Norte - Sur		
Nota - Valor		Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 1	Fase 2	Fase 3
	Código de Movimientos	_____	_____	_____	_____	_____	_____
	Volumen Crítico por fase [CV]	_____	_____	_____	_____	_____	_____
1	Suma Crítica [CS]	_____	_____	_____	_____	_____	_____
	Tiempo Perdido / Fase [PL]	_____	_____	_____	_____	_____	_____
2	Tiempo Perdido / Ciclo [TL]	_____	_____	_____	_____	_____	_____
3	Ajustes para Zona Central [CBD]	_____	_____	_____	_____	_____	_____
4	Relación v/c Crítica [X _{cm}]	_____	_____	_____	_____	_____	_____
5	Status de la Intersección	_____	_____	_____	_____	_____	_____
Cómputos Opcionales de Plan de Tiempos							
6	Suma de Referencias [RS]	_____	_____	_____	_____	_____	_____
7	Longitud de Ciclo [CYC]	_____	_____	_____	_____	_____	_____
8	Tiempo Verde	_____	_____	_____	_____	_____	_____

- Notas:**
1. Suma Crítica = Suma de volúmenes críticos por fases [CV] para todas las fases
 2. Tiempo perdido / Ciclo = Suma de todos los tiempos perdidos por fase, [PL]
 3. Ajustes de Zona Centro = 0.9 en el centro, 1.0 en otras partes
 4. Relación v/c crítica = $CS / ((1 - [TL] / C_{max}) * 1900 * [CBD] * [FHMD])$
 5. Status: (ver instrucciones)
 6. Suma de Referencia = $1710 * [FHMD] * [CBD]$
 7. Longitud de Ciclo = $[TL] / (1 - (Min.([CS], [RS]) / [RS]))$, Sujeto a [C_{min}] y [C_{max}]
 8. Tiempo Verde = $([CYC] - [TL]) * (([CV] / [CS]) + [PL])$

Requerimientos de Cómputo

Los cálculos son basados en los volúmenes de tránsito y en la configuración de los carriles de los afluentes. Los pasos para llevar a cabo el análisis son:

1. Determinar los volúmenes por carril para cada movimiento.
2. Determinar el tipo de protección para cada dirección. Para aplicaciones de planeación, la protección actual de los giros a la izquierda debe ser utilizada, si es conocida. Un giro a la izquierda se considera protegido cuando puede efectuar su movimiento mientras el flujo opuesto esta detenido en ese mismo momento del ciclo. Si la protección actual de los giros

Capacidad de Intersecciones Semaforizadas

a la izquierda es desconocida, se presenta un método simple para determinar la alternativa apropiada.

3. De seis planes alternativos, seleccionar un plan de fases que provea el grado deseado de giros a la izquierda y satisfaga el balance de volúmenes de giros a la izquierda.
4. Determinar la suma de los volúmenes críticos para cada fase y el status de la intersección (bajo, cerca o sobre capacidad).

Esto completa la parte de planeación del análisis. Si se desea un estimado del nivel de servicio basado en demoras, es necesario establecer un plan de tiempos de semáforos. Para lograr esto, hay dos pasos adicionales:

5. Determinar la longitud del ciclo para los volúmenes observados a un grado específico de saturación. Asumir un nivel de saturación del 90%.
6. Dividir proporcionalmente los tiempos de las fases con el criterio de igualar los grados de saturación de los movimientos críticos.

Cuadro 9.19. Factores de ajuste para Giros a la Izquierda en Carriles Compartidos, Análisis de Planeación.

GIRO A LA IZQUIERDA PERMITIDO
<p>Grupos de Carriles con dos o mas Carriles:</p> $[17] = \{ [13] - 1 + e^{-(13)^*[1]^*[16]/600} \} / [13]$ <p>Sujeto a un valor mínimo que aplica a volúmenes izquierdos muy bajos, cuando algunos ciclos no tienen llegadas a la izquierda:</p> $[17] = \{ [13] - 1 + e^{-(1)^*C_{max} / 3600} \} / [13]$
<p>Grupos de Carriles con solo un carril para todos los movimientos:</p> $[17] = e^{-(0.002*((16)+10*[15])^*[1]^*C_{max} / 3600)}$
GIROS A LA IZQUIERDA PROTEGIDOS MAS PERMITIDOS (SOLO UNA DIRECCIÓN)
<p>Si [2] < 1220</p> $[17] = 1 / \{ 1 + ((235 + 0.435*[2])^*[15]) / (1400 - [2]) \}$
<p>Si [2] = 1220</p> $[17] = 1 / (1 + 4.525*[15])$

Cuadro 9.20. Resumen de Plan de Fases para Análisis de Planeación

Plan de Fases	No. de Fase	Tiempo Perdido	Este - Oeste		Norte - Sur	
			Código de Movimiento	Suma Crítica	Código de Movimiento	Suma Crítica
1	1	3	EOF	Max (EF,EI,OF,OI)	NSI	Max (NF,NI,SF,SI)
2a	1	3	OFI	OI	SFI	SI
	2	3	EOF	Max (OF,OI,EI)	NSF	Max (SF,SI,NF)
2b	1	3	EFI	EI	NFI	NI
	2	3	EOF	Max (EF,EI,OF)	NSF	Max (NF,NI,SF)
3a	1	3	EOI	OI	NSI	SI
	2	0	EFI	EI - OI	NFI	NI - SI
	3	3	EOF	Max (OF,EF - (EI - OI))	NSF	Max (SF,NF - (NI - SI))
3b	1	3	EOI	EI	NSI	NI
	2	0	OFI	OI - EI	SFI	SI - NI
	3	3	EOF	Max (EF,OF - (OI - EI))	NSI	Max (NF,SF - (SI - NI))
4	1	3	EFI	Max (EF,EI)	NFI	Max (NF,NI)
	2	3	OFI	Max (OF,OI)	SFI	Max (SF,SI)

Nota: EOF = al este y al oeste de frente; EFI = al este de frente y a la izquierda; OFI = al oeste de frente y a la izquierda; NSF = al norte y al sur de frente; SFI = al sur de frente y a la izquierda; NFI = al norte de frente y a la izquierda; EF = al este de frente; EI = al este a la izquierda; OF = al oeste de frente; OI = al oeste a la izquierda; NF = al norte de frente; NI = al norte a la izquierda; SF = al sur de frente; SI = al sur a la izquierda.

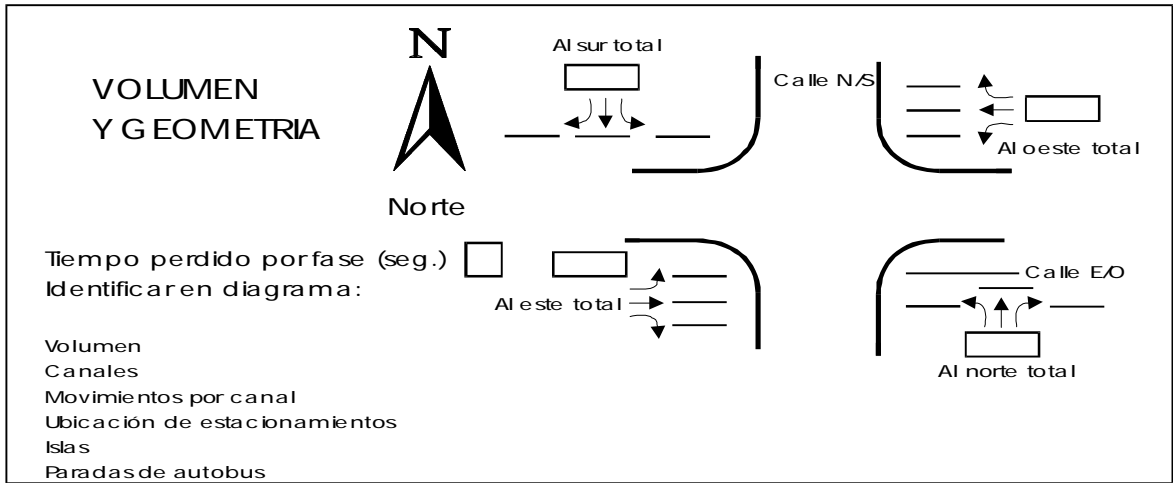
Cuadro 9.21 Vehículos Equivalentes, E_{L1} , para giros a la izquierda permitidos.

N° Total de Fases Semáforo	Tipo de carril a la izquierda	No. de Carriles Opuestos	Flujo Opuesto, V_o						
			0	200	400	600	800	1000	= 1200
2	Compartido	1	1.05	2.0	3.3	6.5	16.0 [*]	16.0 [*]	16.0 [*]
		2	1.05	1.9	2.6	3.6	6.0	16.0 [*]	16.0 [*]
		=3	1.05	1.8	2.5	3.4	4.5	6.0	16.0 [*]
	Exclusivo	1	1.05	1.7	2.6	4.7	10.4 [*]	10.4 [*]	10.4 [*]
		2	1.05	1.6	2.2	2.9	4.1	6.2	10.4 [*]
		=3	1.05	1.6	2.1	2.8	3.6	4.8	10.4 [*]
Mas de 2	Compartido	1	1.05	2.2	4.5	11.0 [*]	11.0 [*]	11.0 [*]	11.0 [*]
		2	1.05	2.0	3.1	4.7	11.0 [*]	11.0 [*]	11.0 [*]
		=3	1.05	2.0	2.9	4.2	6.0	11.0 [*]	11.0 [*]
	Exclusivo	1	1.05	1.8	3.3	8.2 [*]	8.2 [*]	8.2 [*]	8.2 [*]
		2	1.05	1.7	2.4	3.6	5.9	8.2 [*]	8.2 [*]
		=3	1.05	1.7	2.4	3.3	4.6	6.8	8.2 [*]

Capacidad de Intersecciones Semaforizadas

Figura 9.16 Planilla del Módulo de Entradas

PLANILLA DE MÓDULO DE ENTRADA	
Intersección: _____	Fecha: _____
Analista: _____	Periodo Analizado: _____ Tipo de Área: CBD Otro
No. de Proyecto: _____	Ciudad: _____



CONDICIONES DE TRÁNSITO Y DE LA VÍA										
Afluente	Pendiente (%)	% VP	Estacionamiento		Buses N _B	FHMD	Peatones (peat/hr)	Actuación Peat.		Tipo Llegada
			S ó N	N _m				S ó N	Min.	
Al Este										
Al Oeste										
Al Norte										
Al Sur										

Pend. + sube, - baja
 VP: veh. con mas de 4 ruedas
 N_m: maniobras est. por hora

N_B: paradas de bus por hora
 FHMD: factor hora de máxima demanda
 Min. : tiempo mínimo peatones

Tipo de llegadas del 1 al 6

FASES								
D								
I								
A								
G								
R.								
T.	Ver.= A + tr=	Ver.= A + tr=	Ver.= A + tr=	Ver.= A + tr=	Ver.= A + tr=	Ver.= A + tr=	Ver.= A + tr=	Ver.= A + tr=
Actuado?								
Giros Protegidos	Giros Permitidos		Peatones			Ciclo _____ Seg.		

Figura 9.17 Planilla Adicional para Demoras Uniformes de Giros a la Izquierda con Fases Primarias y Secundarias

DATOS DE ENTRADA		IZQ. AL ESTE	IZQ. AL OESTE	IZQ. AL NORTE	IZQ. AL SUR
Vol. Izq. Ajust. de Planilla de Ajust. de Volúmenes	v				
Razón v/c de Planilla de Capacidad	X				
Intervalos de Tiempo de Semáforos					
Verde efc. de fase primaria	verd.				
Intervalo verde de fase secundaria (de planilla adicional para giros a la izq. Permitidos)	verd _q				
Longitud de Ciclo, C ____ Rojo (C-verd. - verd _q - verd _u)	verd _u				
Tasas de Llegadas y Salidas (veh/seg)					
Llegadas : v/(3600(max(X, 1.0)))	q _a				
Salidas en fase primaria: s/3600	s _p				
Salidas en fase secundaria: s(verd _q +verd _u)/(verd _u X3600)	s _s				
CÓMPUTOS					
Protegido + Permitido (G.I. Lider)		Permitido +Protegido (G.I. Posterior)			
X _{perm}	verd _a (verd _q +verd _u)/s _s verd _u	verd _a (r+verd _q +verd _u)/s _s verd _u			
X _{prot}	verd _a (r+verd)/s _p verd	N/A			
CASO					
1. X _{perm} = 1.0 & X _{prot} = 1.0		4. X _{perm} = 1.0			
2. X _{perm} = 1.0 & X _{prot} > 1.0		5. X _{perm} > 1.0			
3. X _{perm} > 1.0 & X _{prot} = 1.0					
Tamaños de Colas Uniformes en Puntos de Transición					
Cola al Principio del verde		Q _a			
Cola al principio del verde no saturado		Q _u			
Cola Residual		Q _r			
Demora Uniforme (de fórmulas presentadas abajo)		d ₁			
Caso	Q_a	Q_u	Q_r	Fórmulas de Demoras	
1.	q _a r	q _a verd _q	0	d ₁ = [.38/(q _a C)] [rQ _a + Q _a ² /(s _p -q _a) + verd _q Q _u + Q _u ² /(s _s -q _a)]	
2.	q _a r	Q _r + q _a verd _q	Q _a - verd(s _p -q _a)	d ₁ = [.38/(q _a C)] [rQ _a + verd(Q _a +Q _r) + verd _q (Q _r +Q _u) + Q _u ² /(s _s -q _a)]	
3.	Q _r + q _a r	q _a verd _q	Q _u - verd _u (s _s -q _a)	d ₁ = [.38/(q _a C)] [verd _q Q _u + verd _u (Q _u +Q _r) + r(Q _r +Q _a) + Q _a ² /(s _p -q _a)]	
4.	0	q _a (r+verd _q)	0	d ₁ = [.38/(q _a C)] [(r+verd _q)Q _u + Q _u ² /(s _s -q _a)]	
6.	Q _u - verd _u (s _s -q _a)	q _a (r+verd _q)	0	d ₁ = [.38/(q _a C)] [(r+verd _q)Q _u + verd _u (Q _u +Q _a) + Q _a ² /(s _p -q _a)]	

CAPITULO X. DISEÑO Y OPERACIÓN DE SISTEMAS DE TRÁNSITO

1. DISEÑO DE INTERSECCIONES AISLADAS Y SEMAFORIZADAS DE TIEMPO FIJO

A continuación se presentan elementos para el diseño de intersecciones semaforizadas de tiempo fijo. Para más información sobre la materia consulte la bibliografía que se anexa a este manual.

El objetivo de esta sección es que su contenido sirva de guía para el diseño, sin embargo, lo que aquí se expone variará al aplicarse, de manera que se ajuste a casos particulares.

Consideraciones

En el diseño de intersecciones semaforizadas se debe considerar lo siguiente:

- Tiempo requerido para mover los vehículos
- Tiempo requerido para mover a los peatones
- Tiempo requerido para desalojar la intersección

Intervalo de Desalojo de la Intersección

La función del intervalo de desalojo es la de prevenir a los conductores respecto a que se aproxima un cambio en la asignación del derecho de paso (se aproxima el intervalo rojo). Los conductores deben tomar la decisión de pararse, o continuar desalojando la intersección para permitir el paso de los movimientos que siguen.

Zona de Decisión: Es una área cerca de la intersección dentro de la cual un vehículo no puede pararse con seguridad o desalojar la intersección sin acelerar antes del inicio del intervalo rojo.

El cálculo de un intervalo de desalojo que minimice la zona de decisión está dado por la ecuación siguiente:

$$AMAR. = t + \frac{v}{2a} + \frac{(ANCH. + L)}{v}$$

donde, AMAR.= Intervalo de desalojo (segundos)

t = tiempo de percepción y reacción (seg.), por lo general 1.0 seg.

v = velocidad del acceso (mts./seg.)

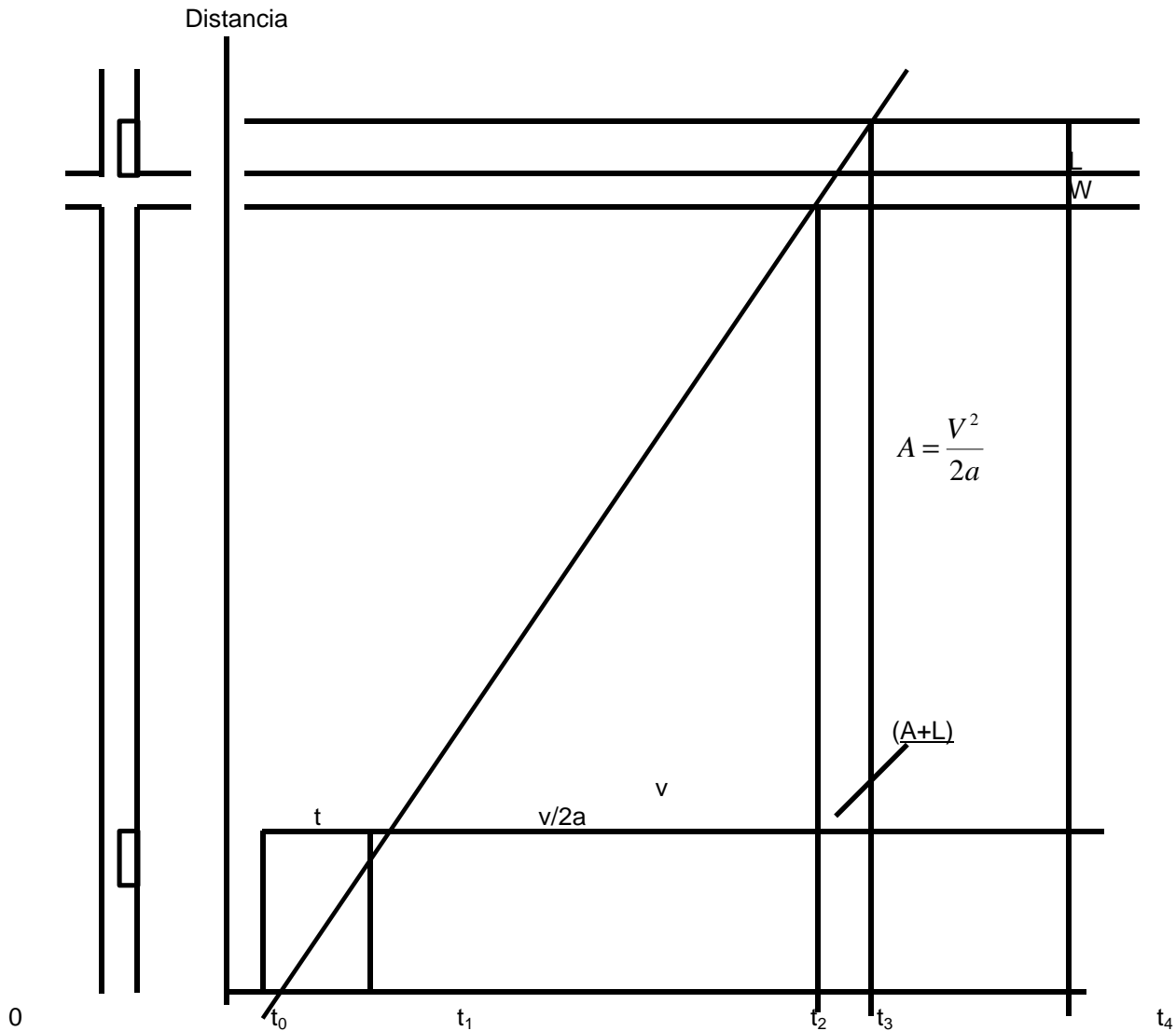
a = tasa de desaceleración (mts/seg²), por lo general 4 mts/seg²

ANCH.= ancho de la intersección (mts.)

L = longitud del vehículo (mts.), por lo general 6 mts.

El rango del intervalo amarillo o de desalojo se encuentra entre 3 y 6 segundos. Cuando se usan valores mayores a los 6 segundos para el intervalo amarillo, éste es usado por los conductores como una parte del intervalo verde y puede crear impaciencia en los conductores del acceso conflictivo. La figura 10.1 ilustra la ecuación anterior.

Figura 10.1. Intervalo de Desalojo de Vehículos



- t_0 = instante en el cual el semáforo se torna amarillo
- t_1 = instante en el cual el conductor reacciona
- t_2 = instante en el cual el vehículo llega a la intersección
- t_3 = instante en el cual el vehículo desaloja la intersección
- t_4 = instante en el cual el vehículo se detiene en la intersección

Requerimientos del Intervalo Verde para Vehículos

La longitud del intervalo verde para vehículos es una función directa de los volúmenes críticos por carril, los intervalos de saturación y el tiempo que se pierde al iniciar y parar la cola. La figura 10.1 del diagrama de espacio/tiempo para un semáforo de dos fases ilustra el comportamiento del tránsito en intersecciones semaforizadas.

Ciclos y Fases

La distribución de los tiempos de los intervalos verdes puede ser estimada usando las ecuaciones siguientes:

$$C = \frac{LX_c}{X_c - \sum_i (v/s)_{ci}}$$

$$(verd.efect.)_i = v_i C / s_i X_i = (v/s)_i (C/X_i)$$

donde, C = longitud del ciclo, en seg;

L = tiempo perdido por ciclo;

X_c = proporción volumen capacidad (v/c) crítica para la intersección;

X_i = proporción v/c para el grupo de carriles i;

$(v/s)_i$ = proporción volumen/saturación para el grupo de carriles i;

(verd.efect.) = verde efectivo para el grupo de carriles i., en segundos.

Las longitudes de ciclo y los tiempos verdes pueden ser estimados utilizando las relaciones anteriores.

Longitud del Ciclo Optimo: es la longitud de ciclo que produce las demoras mínimas para una intersección. Se calcula utilizando la ecuación siguiente:

$$C_o = \frac{1.5L + 5}{1 - \sum_i (v/s)_{ci}}$$

donde, L = nI + R, en segundos;

n = N°. de fases;

I = promedio del tiempo perdido por fase, en seg.;

R = sumatoria de los intervalos de todo rojo por ciclo, en seg.;

Por lo general, el ciclo óptimo para una intersección en particular se encuentra entre los siguientes limites:

$$0.75C_o \leq C_o \leq 1.50C_o$$

Las longitudes de ciclo deben estar entre 40 segundos y 120 segundos. Longitudes de ciclo fuera de estos valores son muy cortas o muy largas.

2. SUGERENCIAS PARA ESTIMAR ELEMENTOS DE DISEÑO DE LA GEOMETRÍA DE INTERSECCIONES

Algunas de las sugerencias que se presentan a continuación, están contenidas en el Manual de Capacidad de TRB. Lo indicado en esta sección son sugerencias que se consideran útiles, pero no deben ser tomadas como estándares estrictos para el diseño de intersecciones.

Carriles Exclusivos para Vueltas a la Izquierda

Los carriles exclusivos para vueltas a la izquierda son usados para servir a altos volúmenes de vuelta izquierda, de manera que no interfieran en los flujos de vehículos de frente y a la derecha. A continuación se presenta una serie de sugerencias para proveer carriles exclusivos de vuelta a la izquierda:

1. Cuando exista una fase exclusiva para vueltas a la izquierda se debe proveer un carril exclusivo de vuelta.
2. Cuando el espacio lo permita se debe considerar la construcción de un carril de vuelta a la izquierda, cuando los volúmenes de vuelta a la izquierda excedan 100 vph.
3. Cuando los volúmenes de vuelta a la izquierda excedan 300 vph., se debe considerar la construcción de carriles dobles para vueltas a la izquierda.
4. La longitud del carril de vuelta a la izquierda debe ser lo suficientemente larga para manejar el tránsito de vuelta izquierda, de manera que no reduzca la seguridad y la capacidad del acceso. A continuación se presenta una metodología para la determinación de la longitud de carriles de vuelta a la izquierda.

Procedimiento para el diseño de la longitud de carriles de vuelta a la izquierda

Existen varios métodos para la determinación de la longitud adecuada para carriles de vuelta izquierda. Las distribuciones Poisson (ver Capítulo VII) proveen una metodología bastante conveniente para este fin.

Es recomendable que la longitud de los carriles de vuelta a la izquierda sea diseñada de manera que el número de vehículos que deseen hacer un vuelta a la izquierda exceda la capacidad del carril de vuelta izquierda sólo un 5% del tiempo. El procedimiento para determinar la longitud (L) de un carril de vuelta a la izquierda basado en una distribución probabilística (Poisson) se ilustra a continuación:

- Calcular m, el número medio de vehículos por intervalo, de la siguiente forma:

$$m = \frac{D \times I}{3600}$$

donde, D = volumen horario de diseño de los vehículos que hacen un vuelta a la izquierda.
I = intervalo de tiempo. Se recomienda usar 60 segundos en áreas rurales y 90 segundos en áreas urbanas y suburbanas. Sin embargo, se pueden usar otros valores, dependiendo de las fases de semaforización.

- En el cuadro 10.1, con el valor calculado de m, se puede obtener el valor de "x", que es el número máximo probable de vehículos que lleguen al carril durante el intervalo dado. Estos valores son obtenidos de una distribución Poisson, de manera que la probabilidad de que "x" sea excedida es de sólo un 5% de las veces.

- Asumiendo una longitud de vehículos de 7.5 metros, el valor de "x" se multiplica por 7.5 metros para obtener la longitud "L", la longitud requerida para el carril a la izquierda en metros. Nótese que el valor de 7.5 metros para cada vehículo puede variar dependiendo del tipo de vehículo escogido para el diseño.

Ejemplo.

Dado un volumen horario de diseño (VHD) = 486 vph., de vehículos que giran a la izquierda en una área urbana, calcular la longitud del carril de vuelta adecuada, de manera que su capacidad no se exceda más de un 5% de las veces.

Solución:

$$m = (486 \times 90) / 3600 = 12.2 \text{ (número medio de vehículos para un intervalo de 90 seg.)}$$

De la tabla 1.10 se obtiene que $x = 19$, por lo tanto el número de vehículos que lleguen al carril durante el intervalo dado excederá la capacidad del carril solo un 5% de las veces si:

$$L = 7.5 \times 19 = 142.5 \text{ m aproximados a 145 m}$$

Cuadro 10.1. Longitud de Carriles a la Izquierda

Número Medio de Vehículos por Intervalo (m)	95 % Número Máximo Probable de Vehículos durante el mismo Intervalo (x)	Longitud del Carril a la Izquierda en metros (L)
0.1 a 0.3	2	15
0.4 a 0.8	3	25
0.9 a 1.3	4	30
1.4 a 1.9	5	40
2.0 a 2.6	6	45
2.7 a 3.3	7	55
3.4 a 4.0	8	60
4.1 a 4.7	9	70
4.8 a 5.4	10	75
5.5 a 6.2	11	85
6.3 a 7.0	12	95
7.1 a 7.8	13	100
7.9 a 8.6	14	110
8.7 a 9.4	15	115
9.5 a 10.2	16	120
10.3 a 11.0	17	130
11.1 a 11.8	18	140
11.9 a 12.6	19	145
12.7 a 13.4	20	150
13.5 a 14.2	21	160
14.3 a 15.0	22	170

Nótese que vehículos opuestos que deseen girar a la izquierda pueden obstruir la visibilidad de los vehículos opuestos a ellos en el acceso opuesto. Si la obstrucción de visibilidad es crítica (no suficiente para la velocidad de diseño de la vialidad), este hecho debe ser tomado en cuenta en el diseño de fases.

Carriles de Vuelta a la Derecha

Por lo general, los carriles de circulación de vuelta a la derecha se construyen por las mismas razones que los carriles de circulación de vuelta a la izquierda. Sin embargo, los vueltas a la derecha son más eficientes que los movimientos a la izquierda, teniendo como tránsito conflictivo sólo a flujos de peatones y no a tránsito vehicular. Como una sugerencia general, se debe considerar la construcción de carriles de circulación exclusivos a la derecha cuando el volumen de vuelta a la derecha exceda los 300 vph y el volumen adyacente recto también exceda 300 vehículos por hora por carril.

Número Total de Carriles

La cantidad de carriles por acceso depende de una serie de factores, incluyendo la semaforización. Como una regla general, donde el espacio lo permita se deben considerar suficientes carriles, de manera que la suma de los volúmenes de todos los movimientos para ese acceso (sumatoria de los movimientos a la izquierda, derecha y de frente) no exceda los 450 vphpc (vehículos por hora por carril). Esta es una sugerencia muy general. Se pueden servir volúmenes más altos en un acceso cuando es posible asignar una longitud de verde mayor a ese acceso en particular. Sin embargo, cuando el número de carriles es desconocido, esta sugerencia puede ser de utilidad.

Se sugiere que cuando las condiciones lo permitan, se consideren carriles de 3.60 mts de ancho.

3. DISEÑO DE SEMÁFOROS

Filosofía del Control del Tránsito

Existen dos tipos de métodos para el control del tránsito: métodos formales e informales. Los métodos formales para el control del tránsito incluyen el uso de señales, demarcación en el pavimento y semáforos. Los métodos informales son la geometría de la vialidad, experiencias personales, otros vehículos y conocimientos previos. Se asume que el método más importante es el método formal de señales para el control del tránsito, demarcación y uso de semáforos. Sin embargo, los métodos formales son la última alternativa cuando el conductor no tiene acceso a fuentes de información informal.

Definición de Semáforos

Semáforos son los dispositivos de control del tránsito que son operados por una fuente de poder, con la excepción de barreras iluminadas o señales eléctricas continuas que sirven para informar a los conductores, dar indicaciones o ayudarlos a tomar decisiones.

Ventajas de los Semáforos

- Hacen que el tránsito se desenvuelva de manera ordenada, asignando el derecho de vía a diversos movimientos, permitiendo que el tránsito sea seguro y efectivo a través de las intersecciones.
- Aumentan la capacidad vial de las intersecciones si están diseñados correctamente.
- Proveen una progresión a través de corredores a determinada velocidad si están correctamente coordinados.
- Permiten el flujo de tránsito de calles menores a través de arterias mayores y más congestionadas.
- Reducen algunos accidentes, en particular accidentes en ángulo recto. Sin embargo, los índices de accidentes, por lo general, aumentan con la instalación de semáforos.
- El uso de semáforos es más económico y eficiente que cualquier tipo de control manual.

Desventajas del Uso de Semáforos

- Causan demoras excesivas si no se diseñan apropiadamente.
- Pueden crear falta de respeto por las señales de tránsito si no son diseñados con propiedad y si son instalados donde no son necesarios.
- Si no son diseñados de manera que sean efectivos y eficientes en el control del tránsito, entonces pueden crear desvíos hacia otras vialidades alternas donde quizás no se desee tránsito adicional.
- Pueden aumentar la frecuencia de accidentes en intersecciones, en particular alcances por detrás.

Selección del tipo de Mecanismo de Control

La selección del tipo de control para una intersección es un proceso particular para cada caso. Cada situación es diferente y debe ser estudiada detalladamente antes de seleccionar el tipo de control adecuado para ella. Sin embargo, a continuación se enumeran una serie de requisitos para la instalación de un semáforo. Si una intersección no reúne los requisitos que se enumeran, entonces debe ser usado otro tipo de dispositivo para el control del tránsito (señal de alto, ceda el paso, etc.).

1. Volumen Mínimo de Vehículos: Se usa cuando el volumen del tránsito que intercepta es la razón principal para considerar la instalación de un semáforo.

Cuadro 10.2 Volumen Mínimo de Vehículos, Requisito 1

Número de Carriles en cada Acceso		Vehículos por hora en vía ppal. ¹ (Total de ambos accesos)	Vehículos por hora en el acceso de mayor volumen de la vía menor. ¹ (en una sola dirección)
Vía Principal	Vía Secundaria		
1	1	500	150
2 o más	1	600	150
2 o más	2 o más	600	200
1	2 o más	500	200

¹Use sólo el 70% de estos volúmenes para los siguientes casos:

1. Las velocidades en el acceso (85 percentil, ver capítulos sobre velocidades instantáneas y análisis estadísticos) son mayores a los 65 kph.
2. Intersecciones aisladas en comunidades rurales.

Nota: Los volúmenes en el cuadro anterior son para las mismas 8 horas. Es decir, durante estas 8 horas, la dirección del volumen mayor en la vía secundaria puede estar en un acceso durante algunas horas y en el acceso opuesto en otras horas.

2. Interrupción del Flujo Continuo del Tránsito: Se usa cuando el tránsito en la vía secundaria sufre demoras excesivas o altos riesgos al cruzar la vía principal.

Cuadro 10.3 Volumen Mínimo de Vehículos, Requisito 2

Número de Carriles en cada Acceso		Vehículos por hora en vía ppal. ¹ (Total de ambos accesos)	Vehículos por hora en el acceso de mayor volumen de la vía menor. ¹ (en una sola dirección)
Vía Principal	Vía Secundaria		
1	1	750	75
2 o más	1	900	75
2 o más	2 o más	900	100
1	2 o más	750	100

¹Use solo el 70% de estos volúmenes para los siguientes casos:

1. Las velocidades en el acceso (85 percentil, ver capítulos sobre velocidades instantáneas y análisis estadísticos) son mayores a los 65 kph.
2. Intersecciones aisladas en comunidades rurales.

Nota: Los volúmenes en el cuadro anterior son para las mismas 8 horas. Es decir, durante estas 8 horas, la dirección del volumen mayor en la vía secundaria puede estar en un acceso durante algunas horas y en el acceso opuesto en otras horas.

3. Volumen Mínimo de Peatones: Se usa cuando existe un número significativo de peatones que desean cruzar una calle y el volumen de vehículos de la calle es tal que les impide cruzar la calle sin demoras excesivas o con altos riesgos.

Cuadro 10.4. Volumen Mínimo de Peatones, Requisito 3

	Vehículos por hora en vía principal	Peatones por hora cruzando la vía principal
Sin Isla Central	600	150
Con Isla Central mayor o igual que 1 m	1000	150

¹Use sólo el 70% de estos volúmenes para los siguientes casos:

1. Las velocidades en el acceso (85 percentil, ver capítulos sobre velocidades instantáneas y análisis estadísticos) son mayores a los 65 kph.
2. Intersecciones aisladas en comunidades rurales.

Nota: Los requisitos de volúmenes deben ser cumplidos durante las mismas 8 horas para ambos; vehículos y peatones.

4. Experiencia de Accidentes: Es usada para justificar la instalación de un semáforo cuando en un periodo de 12 meses han ocurrido más de cinco (5) accidentes que puedan ser corregidos con la instalación de un semáforo; los volúmenes de vehículos y peatones no son menores del 80% de los requisitos anteriormente descritos y la instalación del semáforo no interrumpe seriamente la progresión del flujo de tránsito.

5. Cruces Escolares: Se instala un semáforo cuando en un estudio de la frecuencia de brechas adecuadas (distancia entre un bloque de vehículos y el siguiente) en el flujo de vehículos, relacionadas con el número y tamaño de los grupos de niños cruzando las calles, es menor al número de minutos que dura el estudio. Referencia: ITE, Practicas Recomendadas "Programa para Protección de Cruces Escolares".

6. Progresión: Se justifica la instalación de un semáforo cuando es necesario mantener las agrupaciones y velocidades de vehículos apropiadas para obtener flujo continuo de vehículos en una calle. Idealmente, no se deben instalar semáforos a menos de 300 mts entre uno y otro.

7. Sistemas: Se justifica la instalación de un semáforo cuando la intersección común de dos rutas principales tienen un volumen existente de 800 vph durante las horas pico de cualquier día típico de la semana o en cada una de cinco horas en un sábado o domingo.

8. Requisitos para semáforos actuados: Este requisito se usa cuando no se cumplen completamente ninguno de los requisitos anteriores y hay horas pico impredecibles en el total de ambos accesos de la calle principal o en el acceso de mayor volumen en la calle secundaria. Se justifica la instalación de un semáforo actuado cuando se cumple cualquiera de las condiciones de volumen que se enumeran a continuación:

1. Por una hora de un día promedio (cualquier periodo de cuatro intervalos de 15 minutos consecutivos), el punto que representa a los vehículos por hora de la calle principal (total de ambos accesos) y los vehículos por hora correspondientes al volumen más alto de la calle menor (solo una dirección), está sobre la curva correspondiente en la figura 10.2. Los volúmenes de las calles principal y secundaria son para la misma hora.
2. Para cada una de cualquiera de dos horas de un día promedio, el punto que representa a los vehículos por hora de la calle principal (total de ambos accesos) y los vehículos por hora correspondientes al volumen más alto de la calle menor (solo una dirección), está sobre la curva correspondiente en la figura 10.3. Los volúmenes de las calles principal y secundaria son para las mismas dos horas.
3. Para cada una de cualquiera de cuatro horas de un día promedio, el punto que representa a los vehículos por hora de la calle principal (total de ambos accesos) y los vehículos por hora correspondientes al volumen más alto de la calle menor (solo una dirección), está sobre la curva correspondiente en la figura 10.4. Los volúmenes de las calles principal y secundaria son para las mismas cuatro horas.
4. Para cada una de cualquiera de cuatro horas de un día promedio, el punto que representa a los vehículos por hora de la calle principal (total de ambos accesos) y los vehículos por hora correspondientes al volumen más alto de la calle menor (solo una dirección), está sobre la curva correspondiente en la figura 10.4. Los volúmenes de las calles principal y secundaria son para las mismas cuatro horas.
5. Para cada una de cualquiera de ocho horas de un día promedio, el punto que representa a los vehículos por hora de la calle principal (total de ambos accesos) y los vehículos por hora correspondientes al volumen más alto de la calle menor (solo una dirección), está sobre la curva correspondiente en la figura 10.5. Los volúmenes de las calles principal y secundaria son para las mismas ocho horas.

Cuando la velocidad correspondiente al 85 percentil del tránsito de la calle principal excede 65 KPH, en una zona urbana o rural, o cuando la intersección está en una comunidad aislada de menos de 10000 habitantes, entonces se deben usar las curvas para zonas rurales.

Los requisitos descritos pueden ser usados en conjunto (ver Manual Panamericano de Dispositivos para el Control del Tránsito, Manual de Dispositivos para el Control del Tránsito en Calles y Carreteras de la SCT y Manual of Uniform Traffic Control Devices de la FHWA).

Figura 10.2. Requisitos para la Instalación de Semáforos Actuados. Una Hora de Alta Demanda

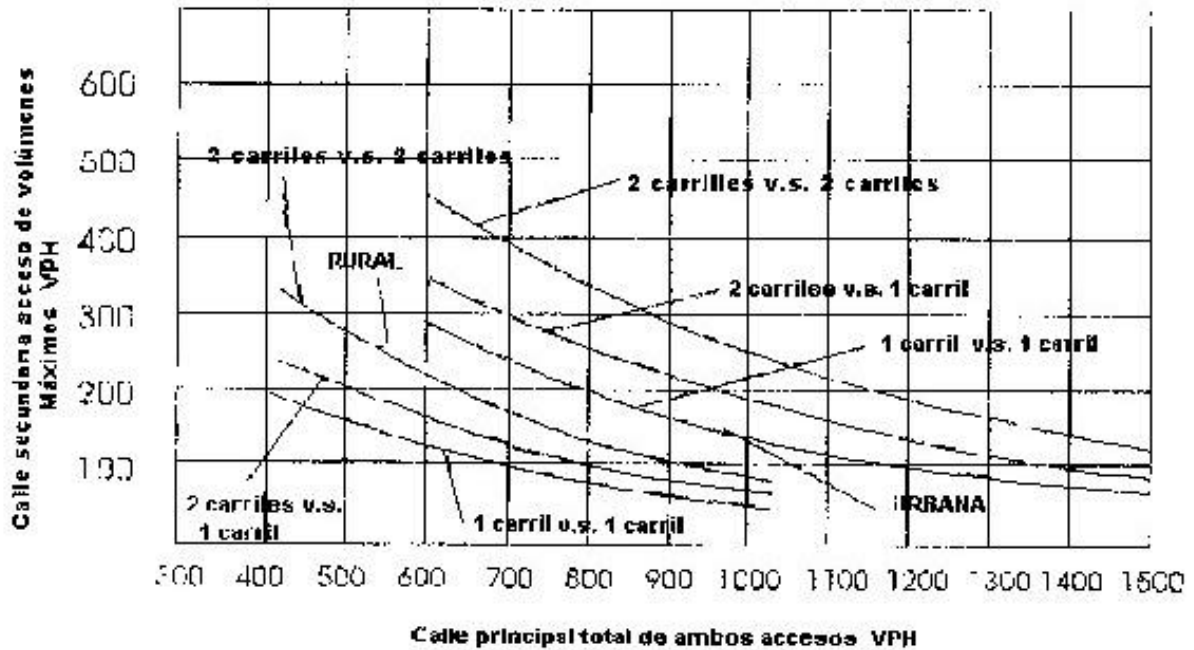
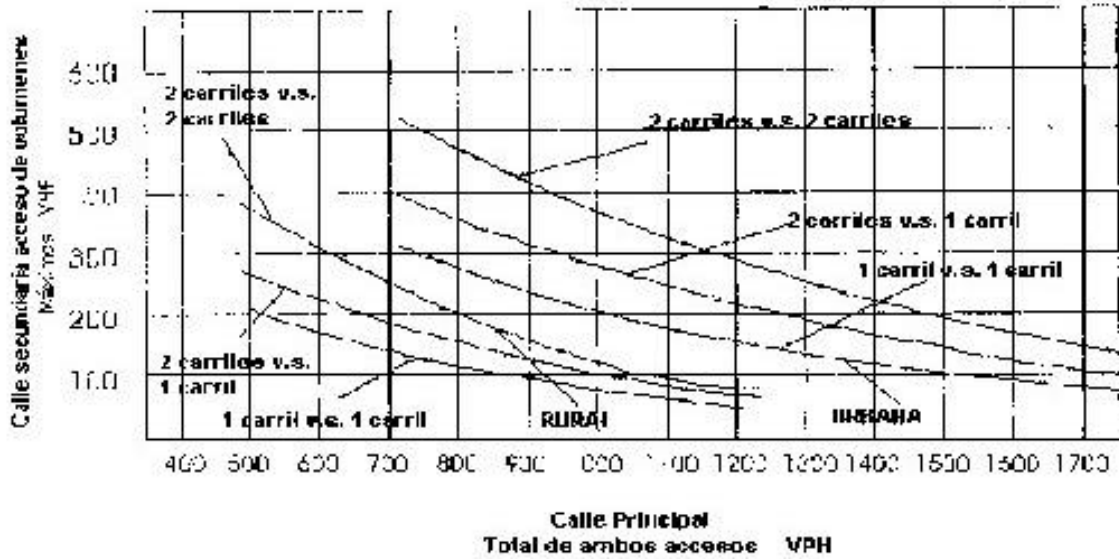


Figura 10.3. Requisitos para la Instalación de Semáforos Actuados. Dos Horas de Alta Demanda.

Figura 10.4. Requisitos para la Instalación de Semáforos Actuados. Cuatro Horas de Alta Demanda.

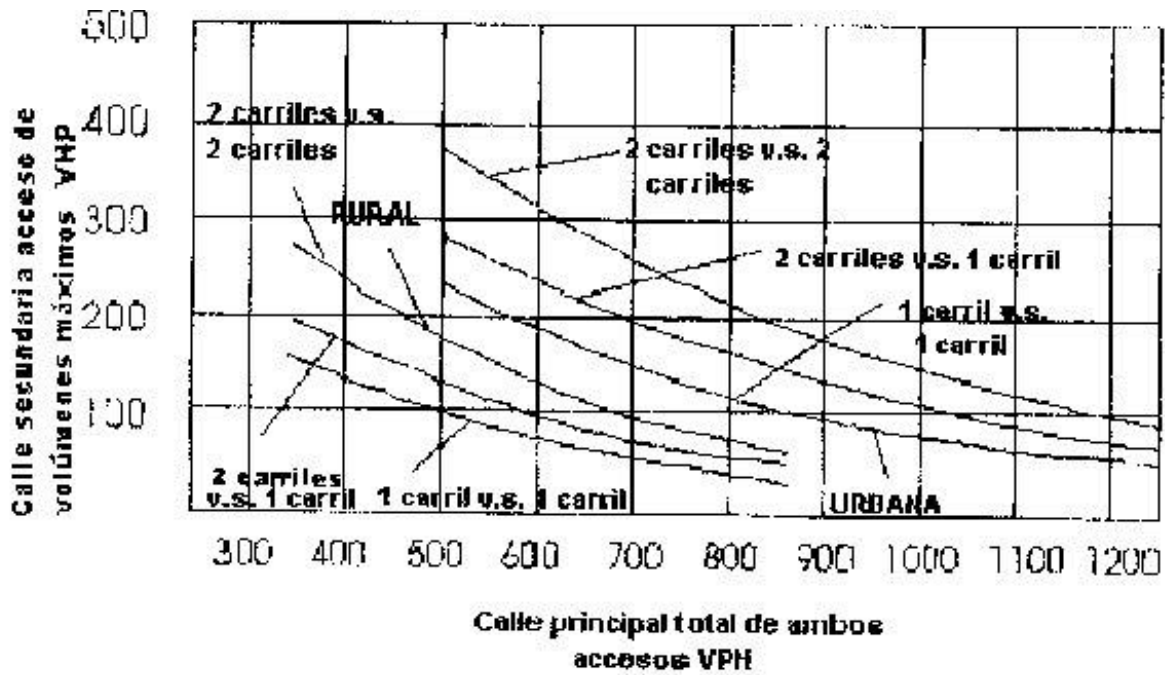
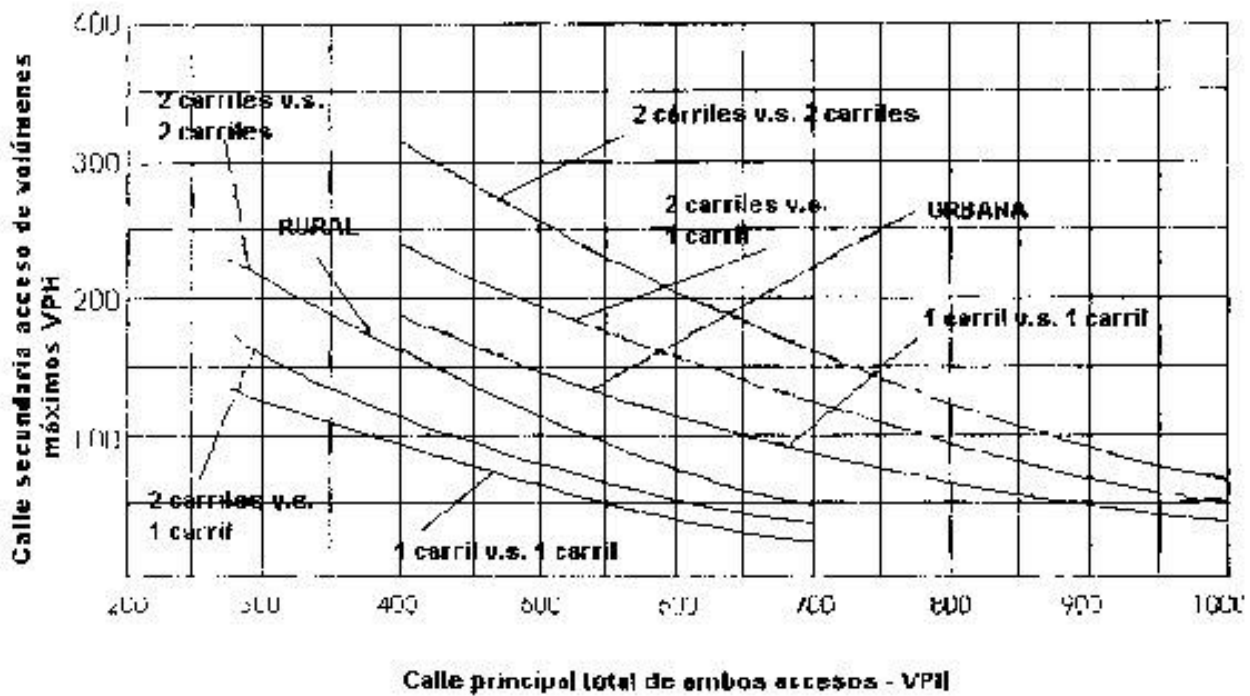


Figura 10.5. Requisitos para la Instalación de Semáforos Actuados. Ocho Horas de Alta Demanda.



Si se decide instalar equipos de control actuado, se debe considerar el uso de equipo completamente actuado en vez de semiactuado. El diseño de controles semiactuados tiende a penalizar al tránsito en la calle principal ya que no se le transmite al controlador ninguna información relacionada con el volumen vehicular de la calle principal.

RESUMEN

Si ninguna de las condiciones anteriores se cumplen, entonces no se debería instalar el semáforo.

Si las condiciones existentes cumplen con una o más de las condiciones anteriores, entonces se puede decir que la instalación de un semáforo es justificada. Sin embargo, eso no quiere decir que un semáforo se debe instalar. No existe un requerimiento absoluto para la instalación de un semáforo simplemente porque una de las condiciones anteriores se cumple. La decisión de instalar un semáforo se debe hacer según principios y práctica de ingeniería de tránsito.

4. SEMÁFOROS ACTUADOS CON RESPECTO A LOS DE TIEMPO FIJO

Introducción

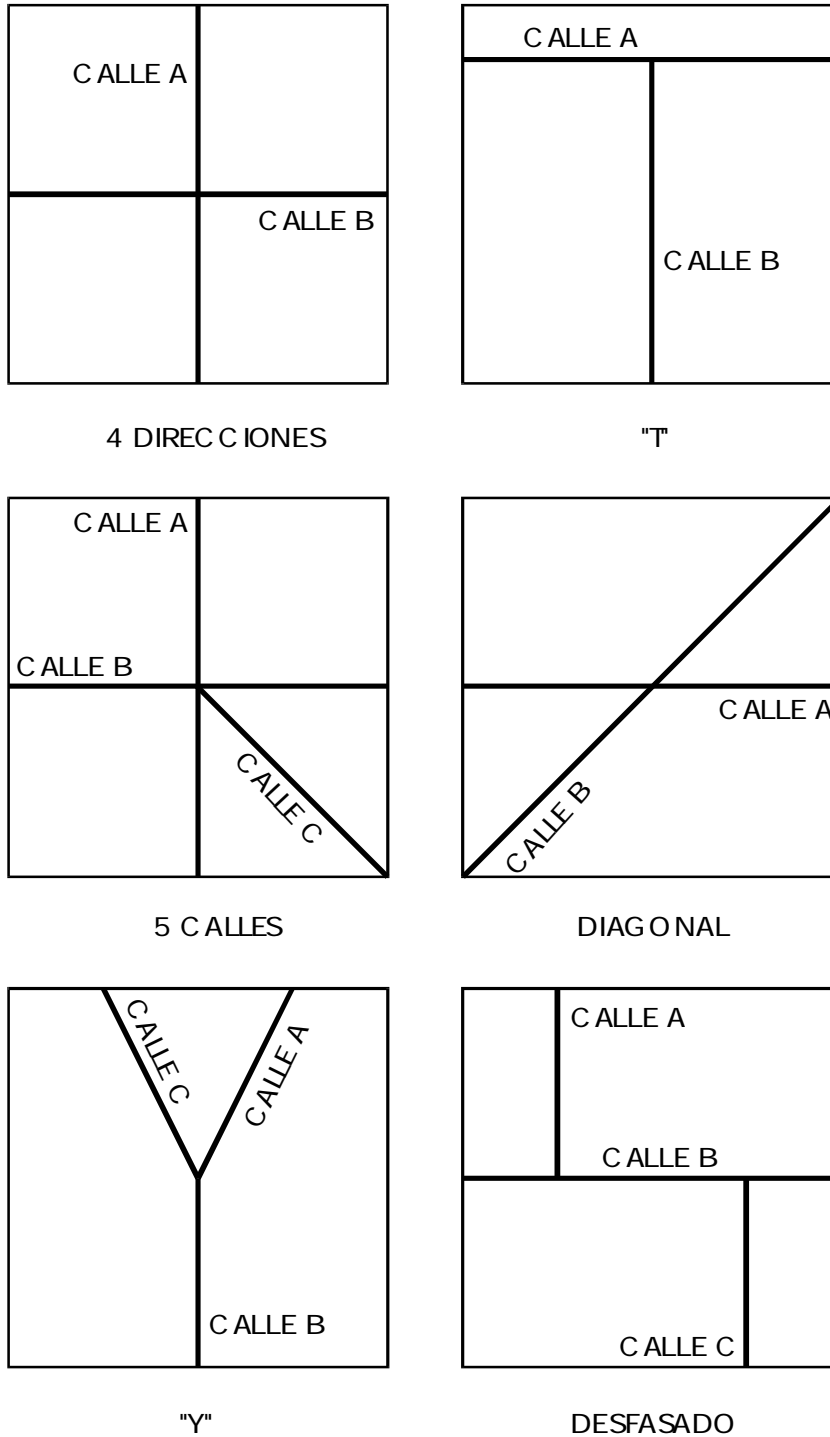
Los semáforos pueden reducir efectivamente las demoras y los accidentes de una intersección. Pero si no son diseñados adecuadamente, el efecto puede ser el contrario. Por lo tanto, es fundamental que se comprendan los elementos necesarios para el diseño de semáforos:

- Análisis de los datos de la intersección
- Selección y capacidades del controlador
- Consideraciones de las fases
- Asignación de tiempos de los mecanismos de control
- Preparación de los planos
- Preparación de las especificaciones
- Estimados de costos

Datos de la Intersección

Cuando se analizan los datos de una intersección, el primer paso a tomar en cuenta es el esquema de la intersección: simple o complejo. El número de calles que se interceptan y el ángulo de intersección tienen una influencia directa en el tipo de control a usarse. En la figura 10.6 se muestran los tipos de intersección más comúnmente encontrados.

Figura 10.6. Tipos de Intersección



El segundo caso es considerar las condiciones físicas (número y ubicación de los carriles de circulación). Un diagrama de las condiciones es de suma ayuda en esta etapa del proceso de diseño.

Finalmente, los volúmenes de tránsito proveen la base para la geometría definitiva de la intersección, la selección del tipo de controlador y el establecimiento de los planes de tiempo y fases para la intersección o el sistema de semáforo.

Selección y Capacidades del Controlador

Después de recolectar todos los datos necesarios, el siguiente paso es la selección del tipo de controlador a instalarse en la intersección. En principio hay dos tipos de controladores: de tiempo fijo y actuados.

Controladores de Tiempo Fijo

Hay diversas variedades de controladores de tiempo fijo. En todos los casos, los tiempos son correctos solo si el tránsito es el mismo que se estimó previamente, por lo tanto, las variaciones normales de minuto a minuto no pueden ser satisfechas. Con equipos de tiempo fijo es necesario estimar los volúmenes de tránsito para las horas del día. Por lo tanto es necesario efectuar conteos y estudios regulares para estimar los cambios en los patrones de tránsito y cambiar los tiempos de las fases de acuerdo a estos cambios. Además, si algo sucede y se interrumpe la rutina normal del tránsito, el controlador de tiempo fijo no provee planes para estos cambios.

5. SEMÁFOROS ACTUADOS

Por lo general, los controladores de semáforos actuados son usados para controlar intersecciones aisladas donde los semáforos de tiempo fijo ocasionan demoras innecesarias a los conductores, ya que estos últimos son incapaces de responder a fluctuaciones grandes de la demanda de tránsito. Por lo general, los controladores actuados no son interconectados con semáforos adyacentes; sin embargo, ciclos de fondo, coordinadores de tiempo real, o control por computadoras pueden ser usados para restringir el intervalo de tiempo verde que se le asigna a los accesos menores. De esta manera los controladores actuados pueden ser incluidos en un sistema. Sin embargo, en este tipo de operación, se limita la capacidad del sistema. Hay tres tipos de controladores actuados: semiactuados, completamente actuados y de volumen/densidad.

A. Controladores Semiactuados

Este tipo de controladores tienen las siguientes características:

- Se usan en intersecciones con una calle de volúmenes altos y otra con volúmenes bajos
- Se colocan detectores en uno o más accesos, pero no en todos.
- Se garantiza la asignación de un tiempo mínimo para la calle principal, la asignación de tiempos en la calle menor esta basada en los ajustes de las especificaciones para controladores actuados.
- Según algunos ingenieros de tránsito, debido a su operación, no deberían ser usados en sistemas de semáforos.

- Tienen el costo más bajo de todos los controladores actuados, a pesar que la diferencia entre semiactuado y actuado completo es muy pequeña.

B. Controladores Completamente Actuados

Tienen las características siguientes:

- Se prefiere su uso en intersecciones donde el tránsito sea similar en todos los accesos.
- Se colocan detectores en todos los accesos.
- Los ajustes de tiempo para el controlador se hacen para los intervalos siguientes:
 - (a) Intervalo Verde Mínimo: tiempo necesario para desalojar la cola de vehículos entre el detector y la línea de alto.
 - (b) Extensión: tiempo de paso entre el detector y la línea de alto.
 - (c) Intervalo Verde Máximo: el tiempo más largo que es aún práctico.
 - (d) Amarillo o tiempo de desalojo
 - (e) Intervalo todo rojo: es usado solo en casos especiales, cuando un intervalo amarillo de cinco segundos no sea suficiente para el desalojo de la intersección.

C. Controladores de Volumen Densidad

Tienen las siguientes características:

- Se usan en intersecciones con flujo de tránsito mayores y que tengan fluctuaciones impredecibles.
- Son bastante complejos.
- Se colocan detectores en todos los accesos.
- Los principios básicos de un controlador volumen/densidad que funcione en dos fases son: la evaluación constante y automática de la demanda para el derecho de paso de vehículos que se muevan en el intervalo de verde, y la acumulación de la demanda para el derecho de paso por parte de los vehículos que esperan en rojo en el acceso conflictivo.
- Los ajustes de tiempo son bastante complejos. Catorce tipos de ajustes evalúan constantemente la demanda para el derecho de paso.
- Es el tipo de controlador más caro del mercado.

Tiempos para Semáforos Actuados

Hay muchos fabricantes de semáforos actuados y el método de operación de cada uno es variable. Para casos particulares la persona encargada de ajustar los controladores debe referirse al manual del controlador. En los párrafos a continuación se habla brevemente de algunas de las especificaciones de controladores de semáforos actuados.

El equipo usado en semáforos actuados es más complejo que equipos para semáforos de tiempo fijo. Sin embargo, los ajustes no son más complicados ya que los ajustes del dial para semáforos actuados son en segundos, mientras que para controladores de tiempo fijo son en porcentajes, por lo general. A continuación se discuten algunos de los ajustes de tiempos para semáforos actuados:

Intervalos Iniciales y de Vehículos (Initial and Vehicles Intervals)

El intervalo inicial es el primer segmento de tiempo verde y es el tiempo durante el cual se inicia el movimiento del tránsito. Este intervalo debe proveer tiempo suficiente para el tiempo perdido al principio de la fase y el movimiento del primer vehículo. Por lo general este proceso toma unos cuatro segundos. También se debe proveer tiempo suficiente para el paso de los vehículos almacenados entre el detector y la línea de alto. En general, se calcula un intervalo de dos a tres segundos por cada vehículo almacenado. Por ejemplo, si hay cinco vehículos almacenados entre el detector y la línea de alto, se proveen 16 segundos para el intervalo inicial, cuatro segundos para el primero y tres para los que siguen.

El intervalo de vehículos (vehicle interval) debe satisfacer las siguientes condiciones:

- Debe ser lo suficientemente largo para que un vehículo viaje desde el detector hasta la línea de alto o hasta la mitad de la intersección si la calle perpendicular es ancha.
- Debe ser por lo menos de una longitud que permita el flujo seguro de vehículos.

Normalmente tres segundos son un buen promedio para un intervalo de vehículos, ya que es una distancia de tiempo segura para vehículos que viajan a velocidades bajas. Se deben colocar detectores bastante cerca de la intersección.

Para ciertos equipos, el tiempo mínimo que un semáforo permanece en verde es un intervalo inicial más un intervalo de vehículos; a menos que un vehículo active el equipo de detección, en cuyo caso, el verde se puede extender hasta alcanzar un máximo.

Intervalo Máximo Verde (Maximum Green)

Como su nombre lo indica, el intervalo máximo de verde es el tiempo máximo que un semáforo puede darle el verde a una fase en particular que este siendo actuada por vehículos mientras otros vehículos esperan en los otros accesos.

En realidad hay dos tipos de máximos, dependiendo del equipo. El primero es el “máximo extendido” (maximum extension), que es el tiempo máximo que el verde puede ser extendido por actuaciones compatibles, tiempo que puede ser contado desde el principio del intervalo de vehículos o desde el momento en el cual se reciba una actuación en la fase conflictiva. El segundo tipo es conocido como el verde máximo, que es el tiempo máximo de verde que puede tener una fase contado desde el principio del verde o desde el momento que se recibe una actuación en la fase conflictiva. El verde máximo incluye el intervalo inicial.

Para establecer los ajuste para el tiempo máximo verde se usan los mismos procedimientos que se usan para calcular los tiempos de semáforos de tiempo fijo.

Selección del Controlador

A. Criterio de Selección

En la decisión de seleccionar el tipo de control (actuado o tiempo fijo), la ubicación de la intersección y sus volúmenes juegan un papel sumamente importante. Por ejemplo, si la intersección a ser semaforizada está a menos de 800 mts. de otra intersección semaforizada, o no permanecerá aislada en un futuro cercano, entonces un sistema interconectado de controladores de tiempo fijo o controladores actuados con ciclos de fondo puede ser usado. Si la intersección es aislada o esta a más de 800 mts. de otra intersección aislada, entonces un semáforo totalmente actuado y no interconectado debe ser considerado.

Controladores de Tiempo Fijo en un Sistema

Si dos controladores de tiempo fijo están operando con el mismo ciclo y están interconectados, sus tiempos pueden ser ajustados para permitir progresión (un conductor que pase el primer semáforo recibirá el verde en el otro semáforo previamente a su llegada). Por ejemplo, si un vehículo se tarda 20 segundos para viajar del primer semáforo al segundo, entonces el segundo semáforo se puede ajustar para que el verde comience 20 después del primer semáforo, y así sucesivamente.

A veces no es recomendable usar controladores de tiempo fijo en un sistema. Si los volúmenes de tránsito de las calles secundarias son bajos es mejor usar semáforos actuados o semiactuados. De esa forma, si no hay demanda por el verde en las calles secundarias, la calle principal mantendrá el verde.

Controladores Semiactuados en un Sistema

Un controlador que tiene una o más fases con un tiempo preajustado y una o más fases actuadas es un controlador semiactuado.

Como se mencionó anteriormente, si un controlador semiactuado tiene un ciclo de fondo, entonces puede ser utilizado en un sistema de semáforos. Un semáforo semiactuado con un ciclo de fondo está diseñado para satisfacer la demanda variable de la calle secundaria y, al mismo tiempo, tener las características de tiempo fijo necesarias para obtener una progresión en la calle principal.

Este tipo de controlador le da tiempo verde a la calle secundaria si, y solo si hay demanda. De otra forma, el verde continúa en la calle principal. La ventaja está en el periodo de tiempo durante el cual la demanda de la calle secundaria es satisfecha. La mejor forma de explicar este funcionamiento es imaginándose el reloj de tiempo de un semáforo de tiempo fijo, dando tiempos a la calle principal y secundaria según las fases previamente establecidas. Hasta que no haya una demanda en la calle secundaria, el ciclo está en el "fondo", de respaldo (background) y no hay cambio: el semáforo permanece en verde para la calle principal mientras el ciclo permanezca en el "fondo".

Supóngase ahora que un vehículo llega a la calle menor y es detectado para producir una "actuación". Si en el momento de la "actuación" el ciclo de fondo "dice" que el semáforo debe permanecer verde para la calle principal (rojo para la calle secundaria), el conductor en la calle secundaria debe esperar. El ciclo (que ya no está en el "fondo") continúa hasta el punto donde el verde de la calle principal finaliza y empieza el verde de la calle secundaria, respondiendo de esa forma a la demanda en la calle secundaria. Si el vehículo hubiera

llegado cuando el ciclo de fondo dice “verde para la calle menor”, entonces hubiera obtenido el verde inmediatamente si la llegada (actuación) era al principio de la fase de fondo. Si la actuación fue al final de la fase de fondo para la calle secundaria, cuando no hay tiempo suficiente para que el vehículo despeje la intersección, entonces el conductor en la calle secundaria debe esperar hasta que el verde para esta calle venga otra vez.

Semáforos Actuados Interconectados

Para coordinar sistemas de semáforos actuados se utilizan ciclos de fondo, coordinadores basados en tiempo, y coordinadores por computadoras. Los resultados han sido variables y en algunos casos no han sido satisfactorios. Por ejemplo, los ciclos de fondo obligan a trabajar al controlador a $\frac{1}{4}$ de su eficiencia, mientras las computadoras convierten a los controladores actuados en controladores de tiempo fijo. Sin embargo, las computadoras son eficientes en el caso de ocasiones especiales (eventos deportivos, etc.). También, en las últimas generaciones de sistemas de control de tránsito y con el uso de computadoras más rápidas, los sistemas actuados se han hecho más dinámicos.

Mientras los ciclos base tratan de predecir las necesidades mínimas del sistema basados en las horas del día, las computadoras tratan de relacionar los datos de tránsito obtenidos en un periodo de tiempo (dígase 4 minutos de demanda) a la demanda del próximo periodo de tiempo (la demanda de los cuatro minutos siguientes). Para que estos sistemas sean eficientes, es fundamental que se mantengan tiempos adecuados. Sistemas más dinámicos han sido diseñados de manera que se les permita a los controladores locales actuados operar libremente la mayor parte del tiempo, reconociendo sin embargo las columnas de vehículos en la calle principal y moviéndolas por el sistema sin ignorar la demanda variable de las calles secundarias. La inteligencia del controlador actuado local contribuye considerablemente al funcionamiento del sistema, proveyendo la señal verde a la columna que llega y midiendo su tamaño exacto en la intersección mientras pasa. Esto es muy importante ya que las columnas varían su tamaño de intersección a intersección. Tiempos excesivos de espera y crecimiento de colas son monitoreados continuamente en las calles secundarias y en los vueltas a la izquierda, y estas demandas son dinámicamente reconocidas y respondidas. Sistemas de otras generaciones le dan poca consideración a estos movimientos. Este sistema es conocido como “Sistema de Respuestas Dinámicas para Sistemas de Tránsito en Arterias”.

Controladores Actuados en Intersecciones Aisladas.

Los equipos actuados son los más eficientes para intersecciones aisladas. Los equipos totalmente actuados responden a las demandas en todos los accesos. Semáforos completamente actuados son también preferidos cuando dos calles principales se interceptan y el semáforo en cuestión no es parte del sistema. En estos casos, todas las fases deben ser flexibles para satisfacer las variaciones en el flujo del tránsito, extendiendo los tiempos en verde para satisfacer las demandas.

Conclusiones

Antes de que una decisión sea hecha acerca del tipo de controlador a usarse, es necesario determinar la frecuencia con la cual se monitoreará la intersección (aforos) para detectar los cambios en los patrones de tránsito después de la “puesta en marcha”. Algunos controladores deben ser minuciosamente “calibrados” para que puedan operar eficientemente. Es importante también determinar la capacidad de las personas encargadas del mantenimiento de

los semáforos: un controlador muy eficiente pero complejo puede crear muchos problemas si el personal de mantenimiento no es lo suficientemente especializado. Muchas veces la capacidad de mantenimiento limita la selección del tipo de control y fuerza la selección de controladores de tiempo fijo.

Ubicación del Controlador en la Intersección

Criterios

- A. Consideraciones Prioritarias
 - 1. Instalar en la proximidad de acometidas
 - 2. Ubicar fuera de áreas donde haya intersección de frecuencias altas
 - 3. Evitar ubicar los controladores sobre servicios subterráneos
 - 4. Ubicar los controladores lo más lejos posible de los carriles de circulación
- B. Otras Consideraciones:
 - 1. Evitar la luz del sol sobre los controladores
 - 2. No bloquear el paso de peatones
 - 3. Ubicar de manera que se minimice el uso de carrilizaciones

Problemas Comunes en el Diseño de Semáforos:

- A. Ubicar los registros detrás de un poste o postes entre la intersección y registro.
- B. No evitar filtraciones en las conexiones subterráneas.
- C. No proveer una manera de desconectar los cables rápidamente en la base de los postes.
- D. Usar conduits muy pequeños.
- E. No proveer circulación de aire en el gabinete del controlador
- F. No proveer tierra
- G. No proveer protección a tormentas eléctricas (rayos)

Sugerencias para una Instalación Efectiva de Semáforos:

- A. Considerar la instalación conjunta de la iluminación y la semaforización de la intersección.
- B. Requerir de los proveedores estándares que faciliten el mantenimiento del equipo por parte de la agencia encargada, por ejemplo: exigir agujeros estándar para todos los gabinetes de los controladores.
- C. Evitar postes de semáforos en la isla central

Récord de Semáforos

- 1. Datos de Diseño:
 - (a) Plan de Fases
 - (b) Planes de Tiempo
 - (c) Coordinación (establecida en el controlador)
 - (d) Tipo de equipo (fecha de instalación, marca y modelo de cada uno de los componentes).

2. Récorods de Mantenimiento

(a) Récorods de Mantenimiento Preventivo: fechas programadas, componentes en mantenimiento.

(b) Mantenimiento fuera de programación: tipo de problema, fecha en que fue reportado, como fue reportado, fecha de llegada a la intersección con el problema, fecha de restauración del servicio.

6. FASES DE SEMÁFOROS

Definiciones

Los términos que se definen a continuación se usan a menudo en esta sección.

Ciclo base o de Respaldo (background cycle): es un aislamiento electrónico que restringe el intervalo de tiempo durante el cual dura el verde de la calle secundaria.

Verde Líder (leading green): cuando la indicación de vuelta a la izquierda es antes de la indicación de verde para el flujo de frente opuesto.

Verde Tardío (lagging green): cuando la indicación de vuelta a la izquierda toma lugar después del verde del flujo de frente opuesto.

Movimiento: el sendero direccional de vehículos en movimiento en un acceso en particular.

Fase: combinación de movimientos que operan simultáneamente

Ciclo: la combinación de fases desde el comienzo del tiempo verde para un acceso en particular hasta el comienzo del próximo verde para el mismo acceso.

Consideraciones para las Fases

El número de fases de un semáforo depende de la complejidad de la intersección. El número de fases tiene un rango que varía entre dos fases (el más simple) hasta ocho fases (el más complicado). La eficiencia de una intersección semaforizada decrece cuando el número de fases se aumenta.

En los arreglos de las fases para un semáforo se deben tener las siguientes consideraciones:

- El volumen del movimiento a la izquierda
- El volumen del movimiento de frente que es opuesto al vuelta a la izquierda
- Accidentes
- La disponibilidad de carriles exclusivos adecuados para vueltas a la izquierda.
- La operación del sistema, la forma en que los arreglos de las fases se relacionan con la operación coordinada con otras intersecciones semaforizadas.
- Actividad de peatones

Los volúmenes de vuelta a la izquierda tienen un efecto obvio en la selección de fases. Si los volúmenes de los movimientos a la izquierda son bajos, no se requiere una fase exclusiva a la

izquierda (cuando se permitan los vueltas a la izquierda durante la fase verde para los movimientos de frente). Los volúmenes opuestos también determinan la necesidad de fases exclusivas a la izquierda.

En el caso de accidentes: cuatro accidentes de vueltas a la izquierda por año justifican la implementación de una fase exclusiva a la izquierda.

La existencia de carriles exclusivos para las vueltas a la izquierda juegan un papel muy importante en la selección de las fases.

Las fases de un semáforo en particular deben ser compatibles con la progresión del sistema. Es importante considerar fases para peatones. Como una regla general, se pueden considerar fases exclusivas para peatones si estos sobrepasan los 150 vehículos /hora en la hora pico.

Arreglo de Fases

A. Normalmente se usan arreglos de dos fases cuando los volúmenes de vuelta a la izquierda son bajos o en calles de un solo sentido. La figura 10.7 muestra un arreglo típico de dos fases. Arreglos de tres fases se usan para satisfacer la geometría de la intersección o la demanda de los vueltas a la izquierda. El arreglo con verdes líderes (leading greens) que se muestra en la Figura 10.8 es muy útil cuando los vueltas a la izquierda son fuertes (en un acceso).

Existe la posibilidad de usar vueltas a la izquierda permitidas (no muy usado en nuestro país). Este tipo de vueltas tiene ciertos problemas de seguridad, sin embargo, puede aumentar la capacidad de los movimientos a la izquierda.

B. Arreglos de cuatro fases se utilizan para manejar los volúmenes rectos y los vueltas a la izquierda. En este tipo de arreglos, los equipos actuados son de gran utilidad variando la longitud de tiempo asignada a las fases u omitiéndolas por completo.

Figura 10.7. Arreglo Típico de dos Fases

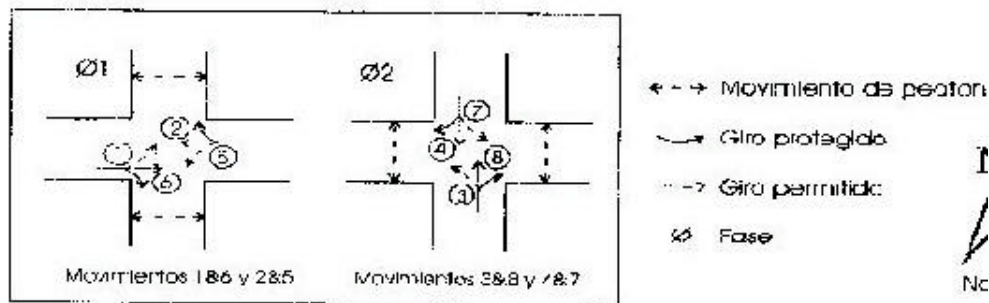


Figura 10.8. Ejemplo de Tres Fases

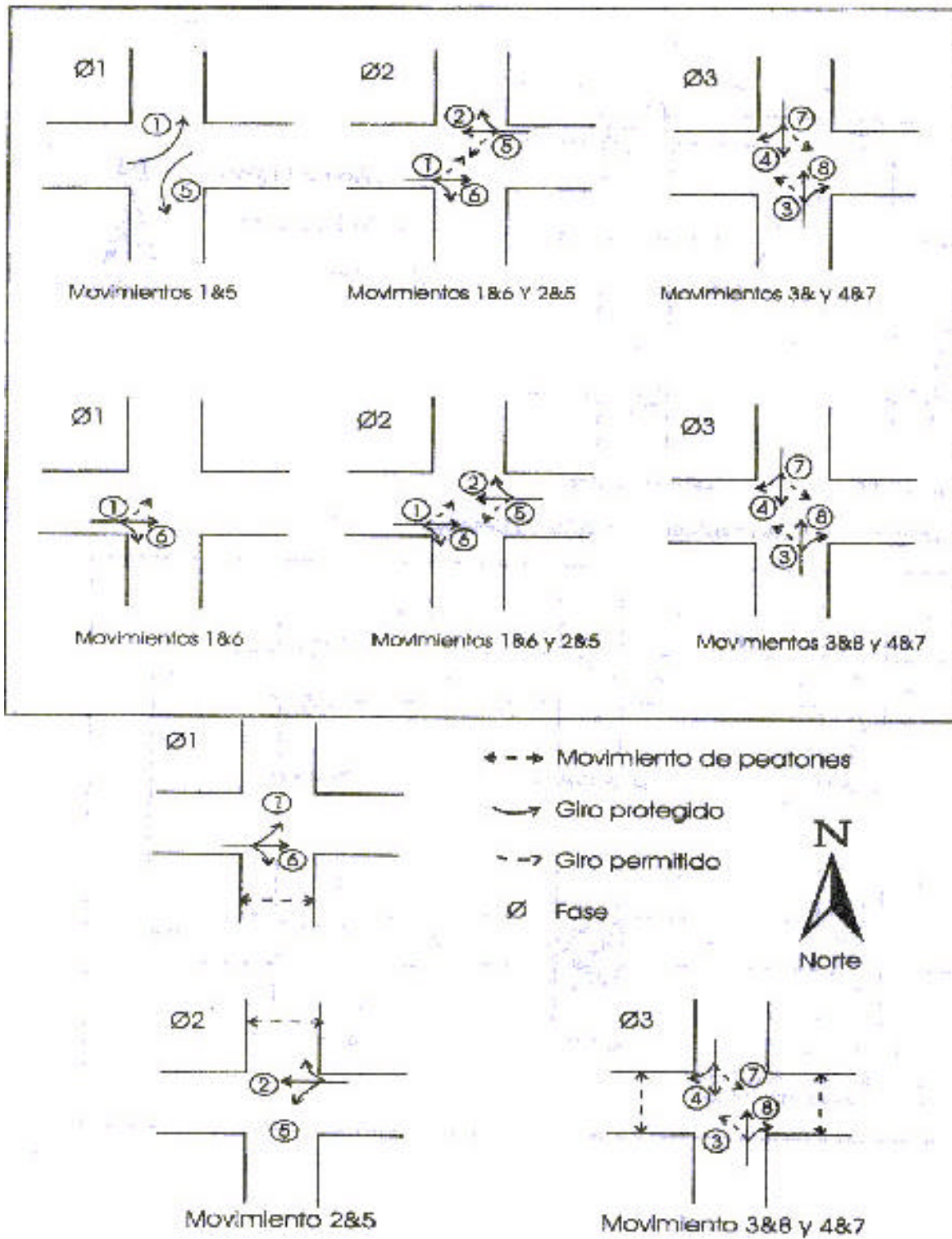


Figura 10.9. Semaforización a Cuatro Fases

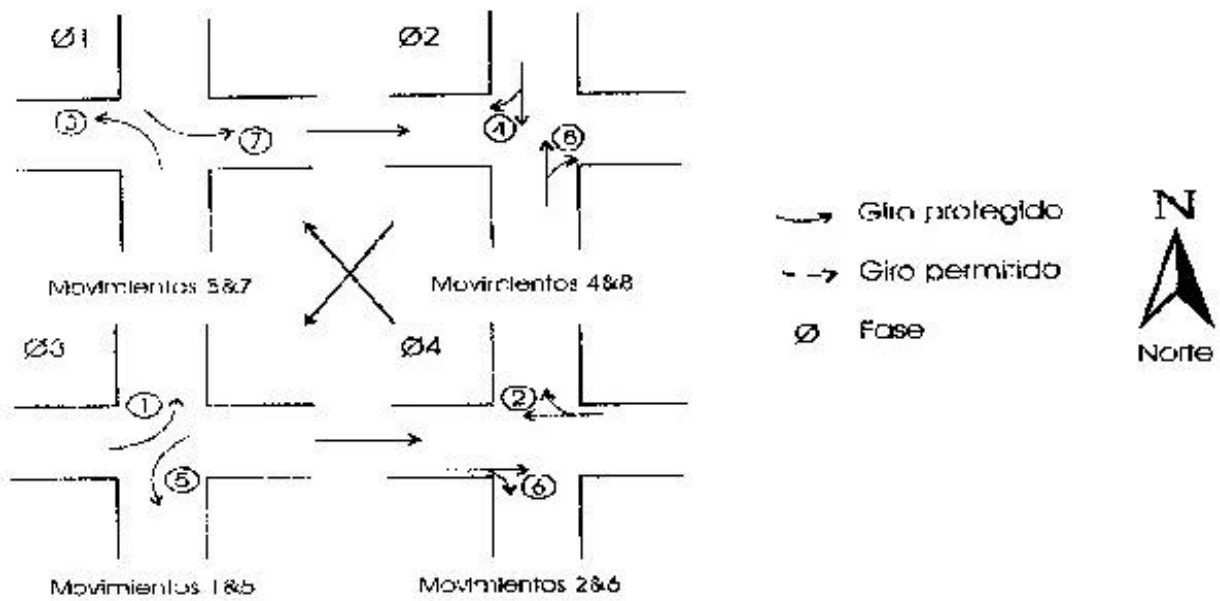
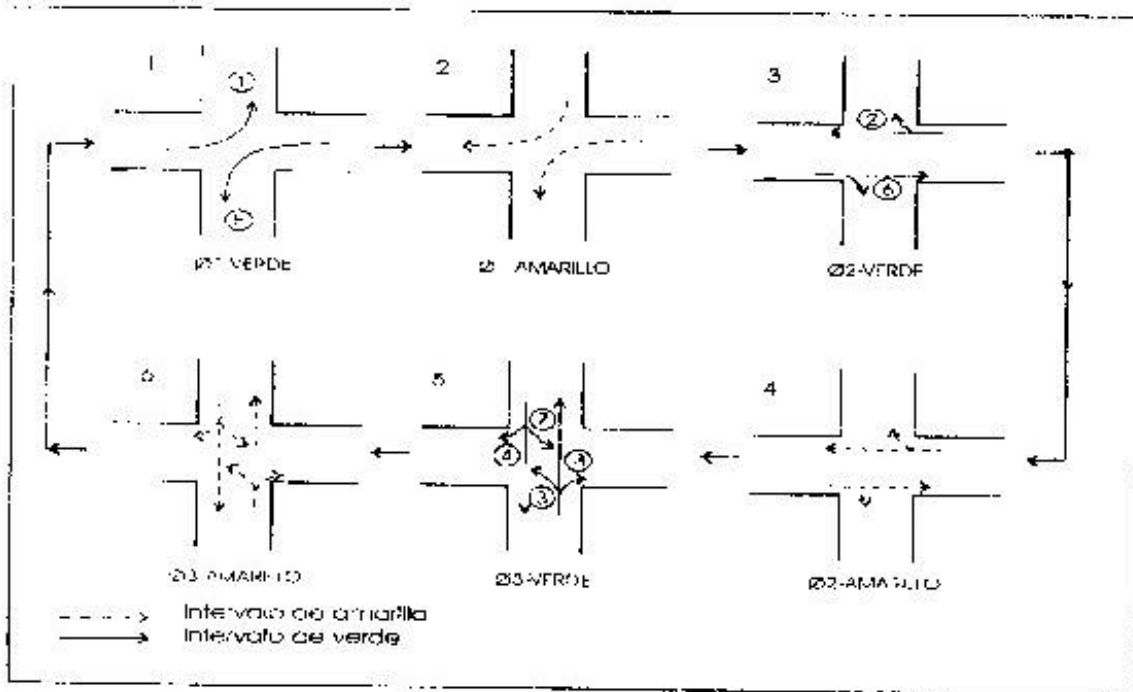


Figura 10.10. Diagrama de Fases mostrando intervalos de Desalojo.



Consideraciones para Fases a la Izquierda

No hay requerimientos precisos para justificar fases para vueltas a la izquierda. Sin embargo a continuación se enumeran ciertas guías que son usadas por algunos organismos (1):

- El producto del volumen de vuelta a la izquierda por el volumen de frente opuesto durante la hora pico es mayor de 50000 en una vialidad de dos carriles y mayor de 100,000 en una vialidad de cuatro carriles.
- Los volúmenes de vuelta a la izquierda durante la hora pico son mayores de 100 vph.
- Los volúmenes de vuelta a la izquierda son tan grandes que más de dos vehículos por ciclo y por acceso se quedan esperando al final de la fase verde (para semáforos de tiempo fijo).
- Los volúmenes de vuelta a la izquierda durante la hora pico son mayores de 50 vph cuando la velocidad de los vehículos que van de frente es mayor de 70 kph.
- Los vehículos que giran a la izquierda tienen que esperar por más de dos ciclos.
- Un vehículo que gira a la izquierda es demorado por un ciclo o más durante una hora.
- Más de cinco accidentes de vuelta a la izquierda en un año.

Las fases de vuelta a la izquierda se pueden identificar en tres categorías:

1. Fase Permitida (P): (no es común en nuestro país, aun cuando “ilegalmente” se practica) no se provee la flecha a la izquierda. Las vueltas a la izquierda son hechas por vehículos que tienen la señal verde circular de frente y efectúan el movimiento a través de las brechas que consiguen en el flujo de tránsito opuesto.
2. Fase Exclusiva/Permitida (E/P). Se provee la indicación de flecha a la izquierda y circular verde en forma consecutiva. Durante la fase exclusiva (protegida), los vehículos tienen el derecho de paso sin flujos de vehículos opuestos. Durante la fase permitida, los vehículos hacen la vuelta a la izquierda a través de brechas aceptables en el volumen opuesto.
3. Fase Exclusiva (o Protegida) (E): Se provee la indicación de flecha a la izquierda y se permite el movimiento solo con esa indicación.

La fase permitida tiene el problema de las tasas de accidentes. En el diseño de la geometría de la intersección se deben tomar precauciones para proveer buena visibilidad si este tipo de operación se va a usar.

Hay dos alternativas para las fases de vuelta a la izquierda (E o E/P). Vuelta a la izquierda líder se refiere cuando la fase exclusiva (protegida) a la izquierda precede a los movimientos de frente. Vuelta a la izquierda tardío o posterior se refiere a la condición donde la fase protegida a la izquierda es posterior a la fase de movimiento de frente. Cuando las demandas de vuelta a la izquierda son desiguales, se puede usar un arreglo de traslape (overlap) de fases; eso es, se inician los vueltas a la izquierda simultáneamente en accesos opuestos, luego, continua el vuelta protegido a la izquierda conjuntamente con el movimiento de frente

en el acceso de mayor demanda (ver figura), y luego los movimientos de frente. Cuando se utiliza equipo actuado, este tipo de fases se pueden alternar en los accesos opuestos.

Ventajas de Fase de Vueltas a la Izquierda Líder o anterior (2):

1. Incrementa la capacidad en accesos de uno o dos carriles cuando no se suministra un carril de vuelta exclusivo (relativo) si se compara con la operación de dos fases (muy relativo).
2. Menos conflictos entre vehículos que cruzan a la izquierda y los flujos opuestos de frente (comparado con la operación de dos fases) ya que las vueltas a la izquierda desalojan la intersección antes.
3. Los conductores reaccionan más rápidamente a esta condición por ser la más común, comparada con las fases de verde a la izquierda posterior a la fase de frente.

Desventajas del Vuelta a la Izquierda Líder (lead left)(2)

1. Al ver la señal de vuelta a la izquierda protegida, los conductores que van de frente pueden intentar efectuar su movimiento.
2. Al final de la fase, los vehículos girando a la izquierda pueden obstruir la fase de frente, reduciendo así el tiempo asignado a estos vehículos.

Ventajas de la fase verde para vueltas a la izquierda posterior a la fase derecho (lag left)(2):

1. Ambas direcciones de los movimientos de frente comienzan simultáneamente.
2. La operación se aproxima al comportamiento de los conductores, ya que en situaciones no semaforizadas, el vehículo que gira a la izquierda le cede el paso a los vehículos opuestos que van de frente.
3. Da oportunidad a los peatones de desalojar la intersección antes del comienzo de la fase a la izquierda.
4. Es bastante efectiva en sistemas coordinados.

Desventajas de Fases a la Izquierda Posteriores (2):

1. Puede crear conflictos al principio de la fase para uno de los accesos (fase posterior) ya que los conductores que giran a la izquierda están acostumbrados a que las fases a la izquierda en accesos opuestos empiecen simultáneamente.
2. Debido a una serie de factores de seguridad vial, la operación de vueltas a la izquierda posteriores a la fase frente se usa por lo general en operaciones de tiempo fijo, en algunos casos de semáforos actuados y en intersecciones "T".

Recomendaciones para la utilización de vueltas a la izquierda

Una serie de investigaciones han tocado el tema de los requisitos para usar fases de vuelta a la izquierda. Sin embargo, ninguna ha sido adoptada como requisito standard y solo son usadas por los ingenieros de tránsito como recomendaciones.

Agent (3) desarrollo una serie de recomendaciones para la consideración de fases de vuelta a la izquierda con un carril exclusivo a la izquierda. Estas recomendaciones consisten de cuatro partes:

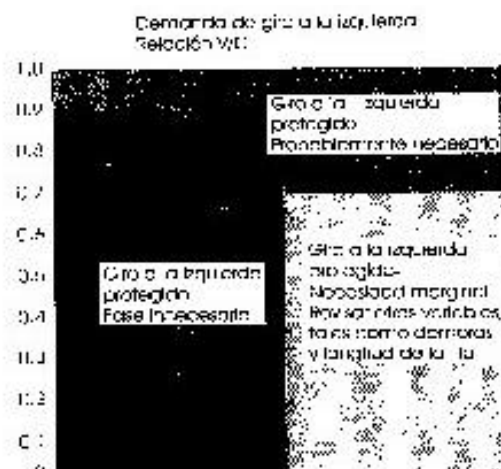
1. Experiencia de Accidentes: se deben instalar fases exclusivas de vuelta a la izquierda si el número crítico de accidentes a la izquierda ha ocurrido. El número crítico de accidentes a la izquierda es 4 por año o 6 accidentes en dos años (por un acceso). Para dos accesos, el número crítico de accidentes es 6 por año o 10 en dos años.
2. Demoras: se justifica la instalación de fases para vueltas a la izquierda cuando existe una demora de 2 vehículos/hora o más durante la hora pico en un acceso. Además, debe haber por lo menos 50 vueltas a la izquierda durante la hora pico y la demora promedio por vehículo debe ser de por lo menos 35 segundos.
3. Volúmenes: se deben considerar fases de vuelta a la izquierda cuando el producto del volumen de vuelta a la izquierda y los volúmenes opuestos durante la hora pico exceden 100.000 en calles de cuatro carriles o 50.000 en calles de dos carriles. Además, el volumen de vuelta a la izquierda debe ser 50 vph como mínimo en la hora pico.
4. Conflictos de Tránsito: se deben considerar fases de vuelta a la izquierda cuando hay un promedio consistente de 14 o más conflictos de vuelta a la izquierda durante la hora pico.

Los criterios anteriormente descritos están incluidos en el MUTCD (4). Este manual también indica que el volumen mínimo de vehículos que giran a la izquierda es de dos (2) vehículos por ciclo, en vez de 50 vph como se indico anteriormente.

Otras recomendaciones para la instalación de fases para vueltas a la izquierda fueron desarrolladas por la Federal Highway Administration, basadas en la relación volumen/capacidad (v/c) y en el número de accidentes a la izquierda. Las condiciones necesarias para la instalación de fases exclusivas para vueltas a la izquierda se ilustran en la Figura 10.11.

Como se indica en la Figura 10.11, una relación v/c de 0.7 a 0.9 además de 3 a 4 accidentes por año sugiere una necesidad solo marginal para fases exclusivas de vuelta a la izquierda. Esta figura puede ser usada como una indicación para evaluar la posibilidad de instalar una fase exclusiva para vueltas a la izquierda. Sin embargo, se debe usar con precaución.

Figura 10.11. Gráfico de Condiciones Necesarias para la Instalación de Fase a la Izquierda Exclusiva.



La sección del ITE de Florida recomienda el uso de fases exclusivas cuando:

1. Se opera con carriles dobles de giro a la izquierda
2. La visibilidad del vehículo que gira a la izquierda para ver los vehículos opuestos es menor de 85 mts si la velocidad es de 60 KPH o menor que la distancia que se puede recorrer en 5 segundos a la velocidad prevaleciente en el flujo opuesto.

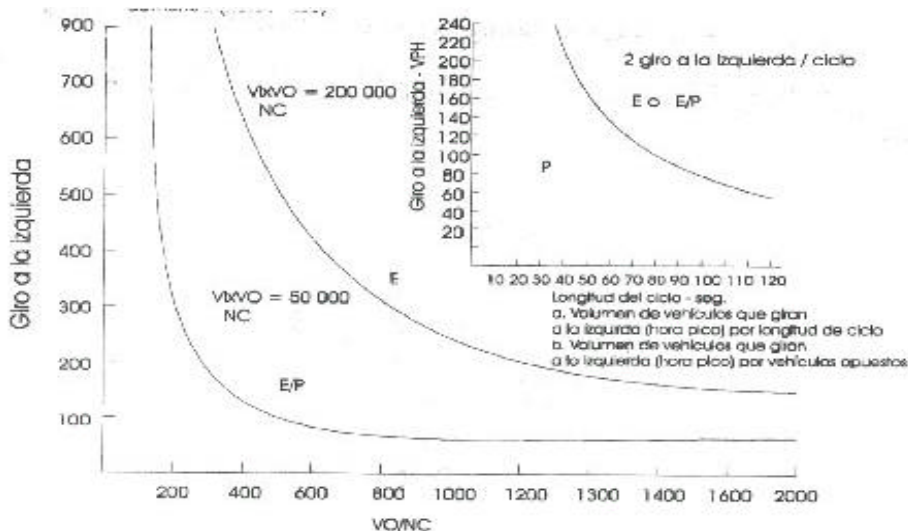
La sección del ITE de Florida tiene también recomendaciones acerca de consideraciones para no instalar fases E/P (exclusivas/permitidas) e instalar solo fases exclusivas:

1. Falta de visibilidad por geometría o por bloqueo de los vehículos que giran a la izquierda en el carril opuesto.
2. Velocidades en el flujo opuesto mayores a los 70 KPH.
3. Los vehículos que giran a la izquierda deben cruzar mas de 3 o 4 carriles de flujo opuesto recto.
4. Han ocurrido por lo menos 6 accidentes con vehículos que giran a la izquierda en los últimos 12 meses.

Otros requisitos para la instalación de fases a la izquierda (parecidos a los anteriormente descritos) fueron desarrollados en Virginia. Algunos de estos requisitos fueron resumidos en el gráfico que se presenta en la Figura 10.12. El gráfico ofrece recomendaciones para fases a la izquierda basadas en volúmenes de horas pico. Los valores en el gráfico son basados en el producto de los volúmenes que giran a la izquierda por los vehículos opuestos ($VI \times VO$) divididos por el número de carriles en el flujo opuesto (NC). Para valores de $VI \times VO/NC$ menores a 50.000 se recomienda la fase permitida (P) hacia la izquierda. Para valores entre 50.000 y 200.000 se recomienda fases Exclusiva/Permitida (E/P) mientras que para valores mayores de 200.000 se recomienda solo la fase exclusiva.

Todas las recomendaciones anteriores son una base de apoyo para el ingeniero de trafico y no deben considerarse como estándares. El ingeniero de trafico aplicara su criterio acorde con las condiciones de cada caso, políticas del Municipio, etc.

Figura 10.12. Requerimientos para fases a la izquierda, basado en volúmenes de horas pico.

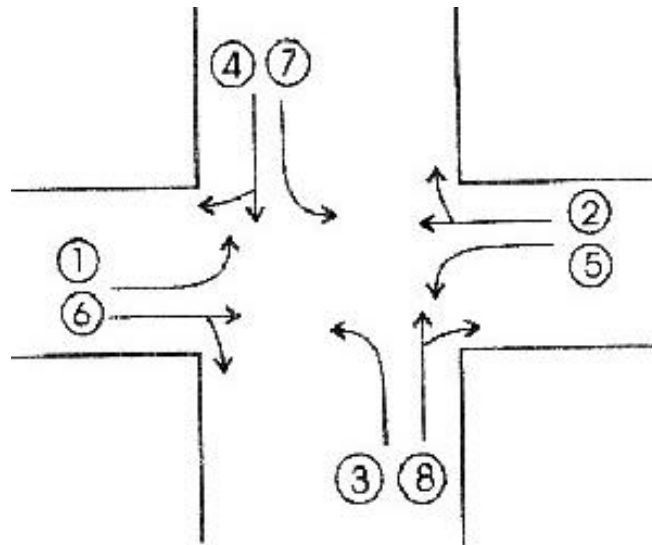


FASES DE SEMÁFOROS

Sistema de Numeración de Fases según NEMA (National Electrical Manufacturers Association)

A efecto de homogeneizar el sistema de numeración para los movimientos de tránsito, NEMA ha establecido el siguiente sistema para todos los controladores actuados. La figura 10.13 ilustra el sistema.

Figura 10.13. Sistema de Numeración NEMA



Las figuras 10.14, 10.15, y 10.16 ilustran secuencias de fases en un controlador.

Fig. 10.14. Esquema NEMA para Verde a La izquierda Líder o Anterior

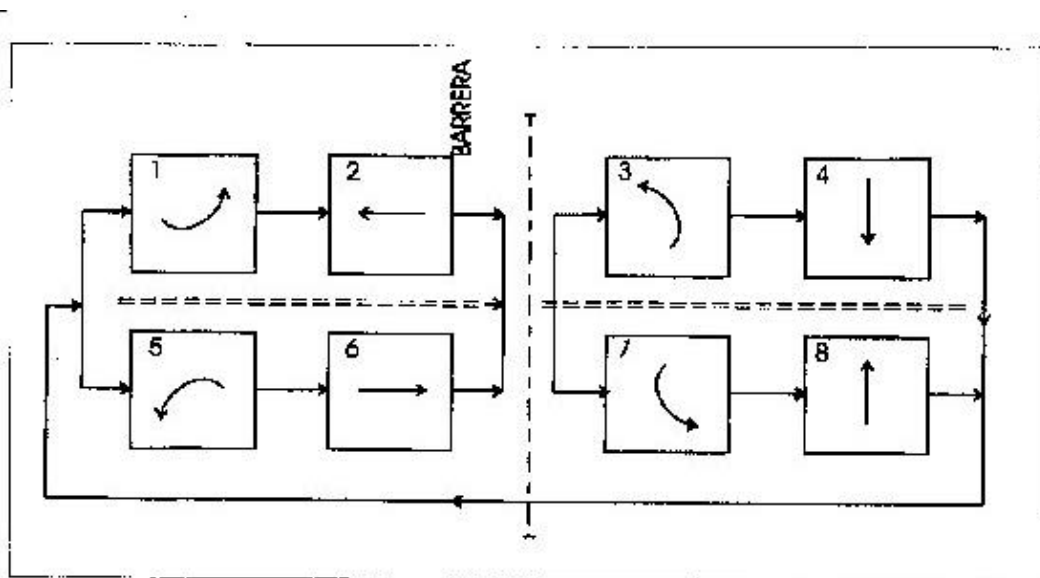


Figura 10.15. Esquema NEMA para Verde a la Izquierda Posterior

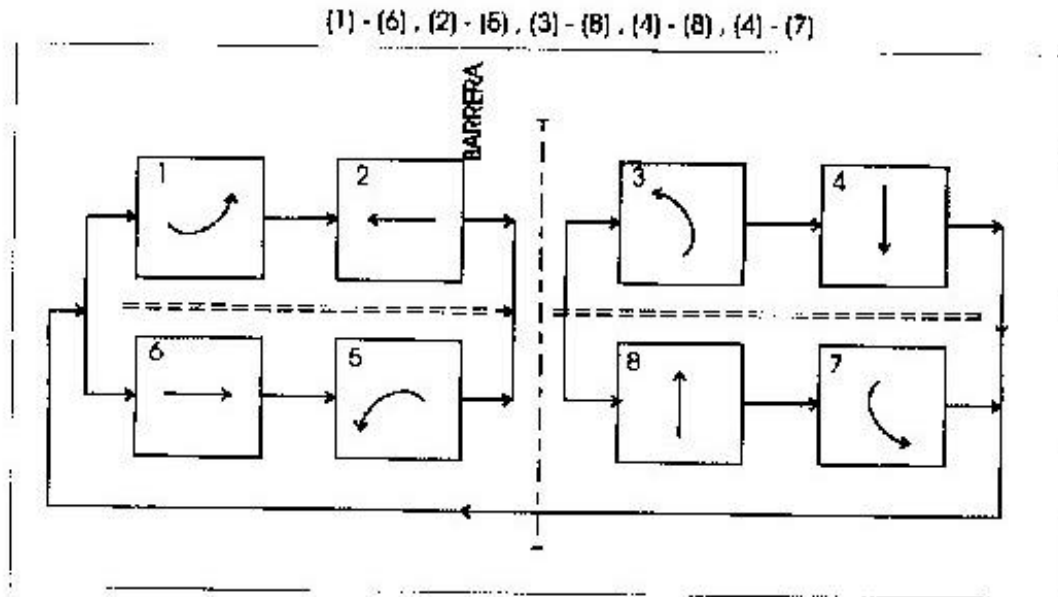


Figura 10.16. Esquema NEMA para verde a la izquierda anterior y posterior

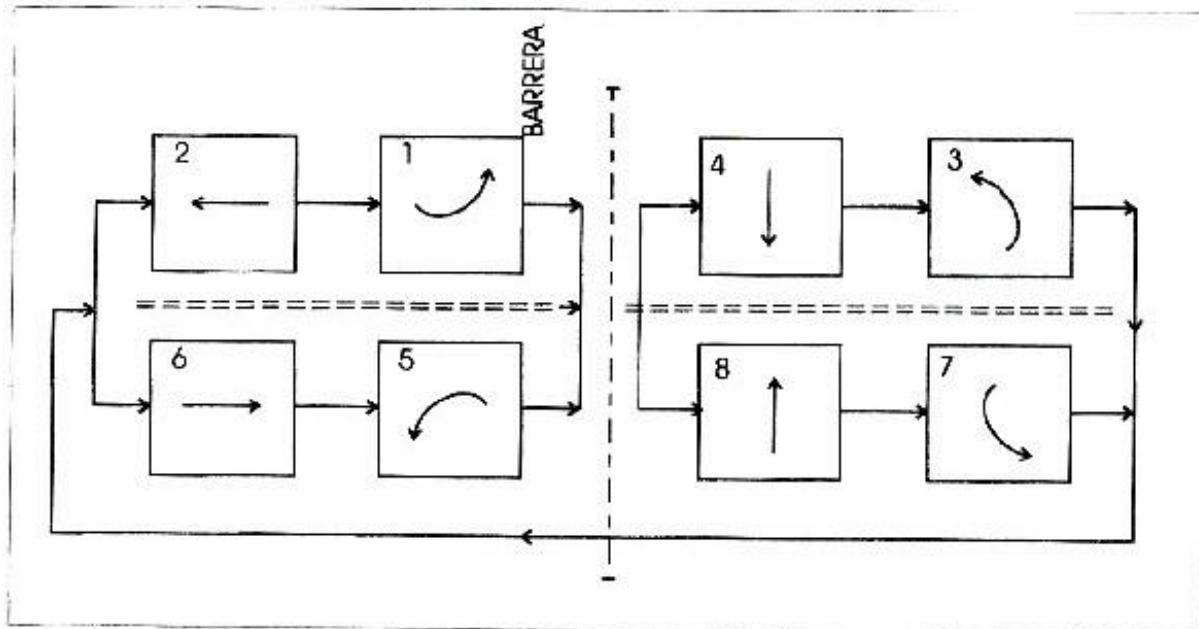


Figura 10.17. Cuatro fases con movimientos separados para cada afluente

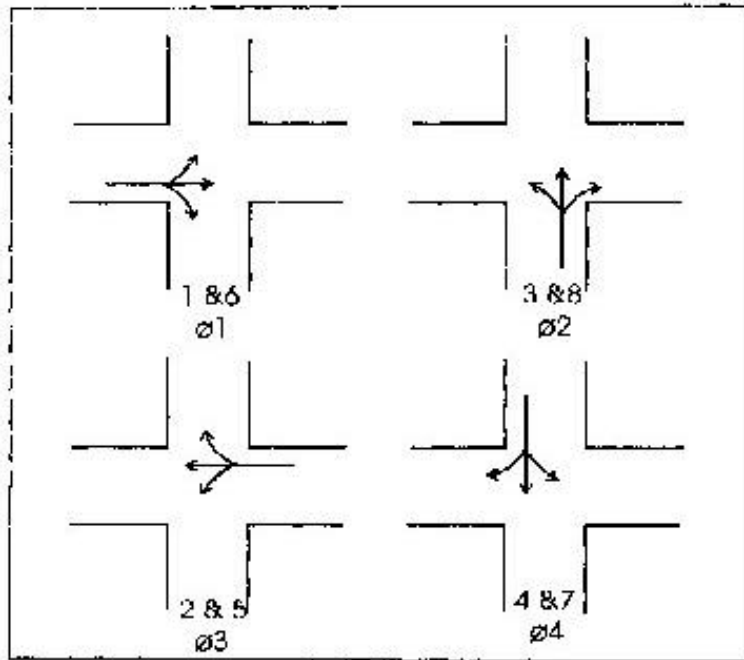
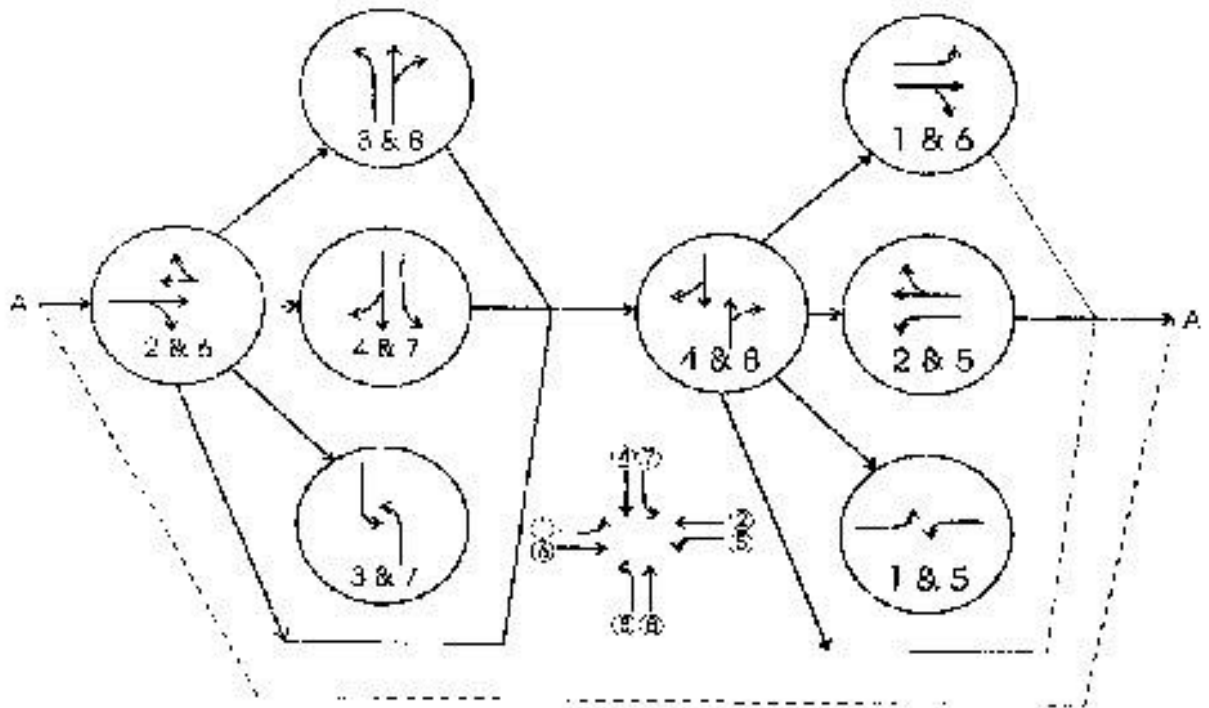


Figura 10.18. Ocho Fases o Fases Múltiples.



7. CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DE FASES

A. Generales

1. Políticas Municipales
2. Financiamiento Disponible
3. Costos del Usuario

B. Específicas

1. Volúmenes de Giro a la Izquierda
2. Volúmenes de Trafico derecho
3. Historia de Accidentes
4. Espacio disponible (para carriles exclusivos de giro a la izquierda)
5. Intersección parte de un sistema coordinado
6. Actividad de Peatones (Tiempo para peatones)

C. Consideraciones para Fases a la Izquierda

1. Volúmenes Opuestos
2. Mas de tres carriles en afluente opuesto
3. Mas de dos giros a la izquierda por ciclo
4. La cola de vehículos que giran a la izquierda excede la capacidad del carril
5. Los giros a la izquierda bloquean el flujo derecho

D. Tipos de configuración para fases a la izquierda (anterior o líder y posterior)

La fase de giros a la izquierda anteriores (antes de la fase recto) son considerados mejores que los posteriores; sin embargo, la diferencia es insignificante. La fase anterior permite a los vehículos que giran a la izquierda el desalojar la intersección y no interferir con los movimientos rectos. Los vehículos que giran a la izquierda en la fase anterior oponen a vehículos que están parados en el afluente opuesto. Los giros a la izquierda en la fase posterior oponen un flujo recto que se acerca a la intersección y se le obliga a parar. Esta condición puede ser más insegura. Por lo tanto, se recomienda que las condiciones de uso de fases a la izquierda, anteriores o posteriores, sean de acuerdo con los requerimientos del sistema o circunstancias del flujo de tránsito. Las figuras 10.17 y 10.18 son ejemplos de alternativas de fases.

Reglas Rápidas para Análisis de Fases

- A. Obtener los volúmenes críticos por carril
- B. Calcular las horas de tiempo requeridas para cada fase

Cuadro 10.6a. Reglas Rápidas para arreglo de Fases. Condiciones de Operación Deseables.

	NDS "C" (deseable)	NDS "D" (máximo)
Volumen Recto	1200 vph de verde	1600 vph de verde
G. Izq. Protegido	1100 vph de verde	1450 vph de verde
G. Izq. No Protegido	800 vph de verde	1200 vph de verde

- C. Sumar las horas verdes que se requieren. Si el esquema de fases requiere más de 0.9 horas de verde, entonces el esquema de fases no trabajará eficientemente. Si requiere menos de 0.8 horas, el esquema será relativamente ineficiente debido al tiempo verde no usado. Se recomienda el uso de niveles de servicio (NDS) "B" y "C" para diseños nuevos y "D" para intersecciones semaforizadas ya en existencia.

Como un ejemplo, considérese una intersección de dos calles de cuatro carriles divididos con carriles exclusivos para giros a la izquierda en todos los afluentes. Asígnese un esquema de tres fases. Se determina el volumen crítico por carril para todos los afluentes y se selecciona el mayor por fase. Los procedimientos para calcular los volúmenes críticos se discuten luego. Se determinan los siguientes volúmenes:

ϕ 1	450 vph
ϕ 2	488 vph
ϕ 3	265 vph

Comparando estos volúmenes con los volúmenes para NDS "C", se determina lo siguiente:

ϕ 1	$450/1100 = 0.41$
ϕ 2	$488/1200 = 0.41$
ϕ 3	$265/1200 = 0.22$
Total	1.04

Como 1.04 sobrepasa 0.9, el esquema de fases propuesto es ineficiente para NDS "C". En un chequeo de la eficiencia a NDS "D":

ϕ 1	$450/1450 = 0.31$
ϕ 2	$488/1600 = 0.31$
ϕ 3	$265/1600 = 0.17$
Total	0.79

El valor es 0.79, casi 0.8, por lo tanto se espera que sea eficiente a NDS "D".

Recomendaciones para Fases

- A. Usar el número mínimo de fases para cumplir con las necesidades del tráfico
- B. Los ciclos prácticos están entre 40 seg. y 120 seg. Sin embargo, nunca exceder 180 seg. de ciclo bajo condiciones de saturación ni 90 seg. con flujos bajos.
- C. Mantener el verde sin uso en un mínimo.

8. TIEMPOS DE SEMÁFOROS

Tiempos para Semáforos de Tiempo Fijo

La asignación de tiempos de un semáforo de tiempo fijo es el proceso de determinar como es la distribución de los volúmenes en los afluentes, determinación de la longitud del ciclo y como dividir el ciclo para satisfacer la demanda.

Los controladores de tiempo fijo se pueden adquirir con uno o mas diales (electromecánicos viejos) de manera que se puedan satisfacer las variaciones de volúmenes (en cierta forma). Usando un reloj, el controlador cambia de un dial al otro dependiendo de la hora del día. Los controladores de estado sólido pueden ser adquiridos con unidades de coordinación basadas en tiempo de manera de proveer varios planes de tiempo. Sin embargo, en el siguiente ejercicio se calcularan los tiempos de un semáforo con un solo dial.

En la figura 10.19 se indican las fases que se consideran necesarias para la intersección que se ilustra en la Figura 10.20. Los volúmenes son los indicados con los volúmenes de camiones indicados entre paréntesis).

Figura 10.19. Fases de la Intersección

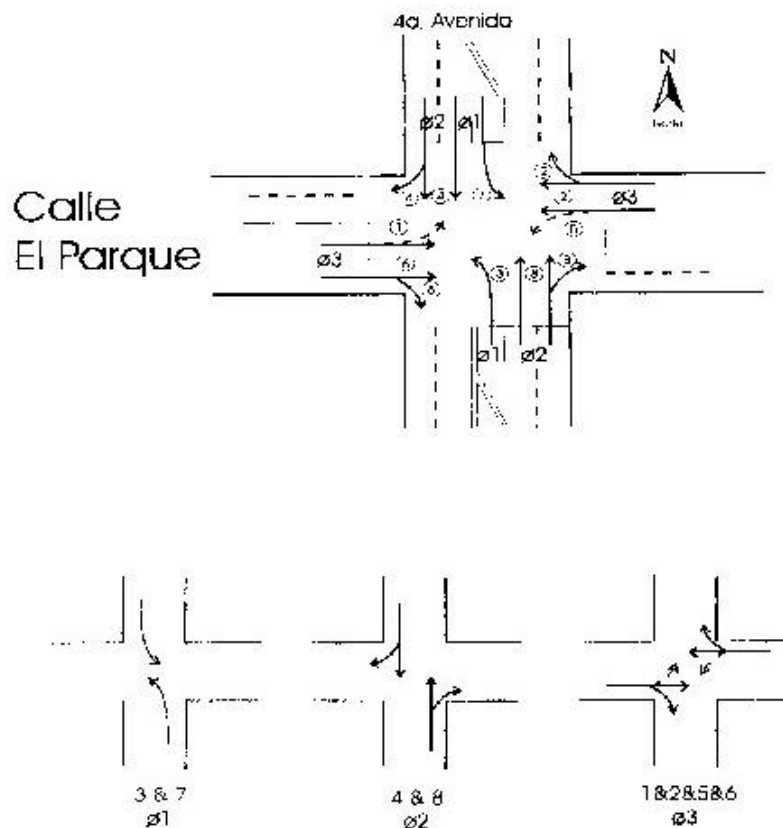


Figura 10.20. Volúmenes de Diseño

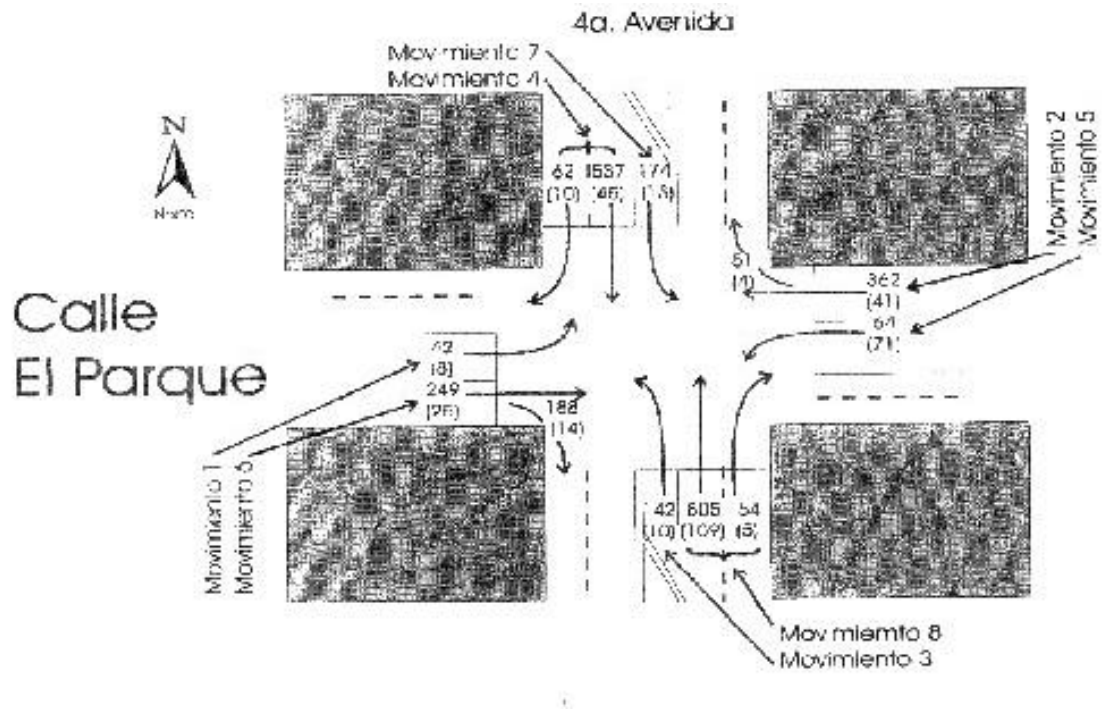
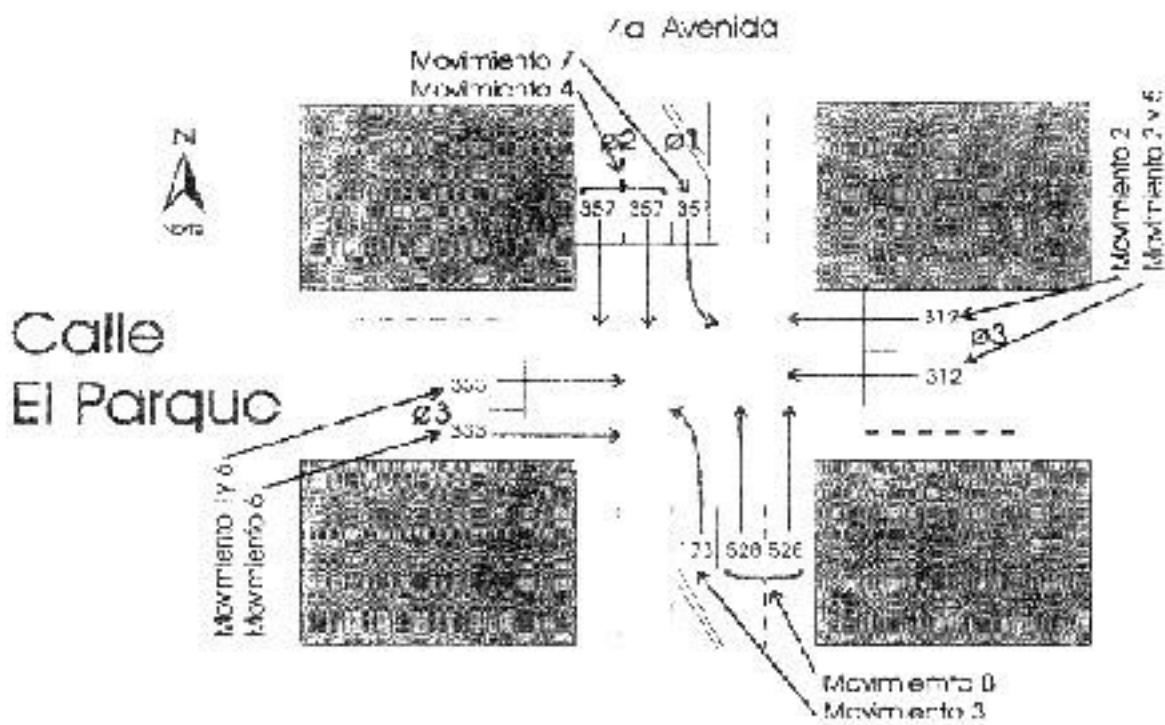


Figura 10.21. Vehículos Equivalentes



A. Cálculo de Volúmenes Equivalentes

Debido a que los vehículos que giran y vehículos pesados producen mas congestión que los vehículos livianos que van recto, se usa un “denominador común”, el “vehículo equivalente”. Los factores comúnmente usados son:

Autobuses y Camiones:	1.5
Giros a la Derecha:	1.4 (1.25 con un amplio radio de giro)
Giros a la izquierda:	1.6 (1.1 si se usa un carril exclusivo)

En el cuadro 10.5 se ilustra la conversión a vehículos equivalentes de los volúmenes que se ilustran en la figura 10.20. Los volúmenes equivalentes ya calculados se presentan en la Figura 10.21.

Cuadro 10.5
Conversión a Vehículos Equivalentes, intersección Calle El Parque con 4^{ta} Avenida

<u>Movimiento 1</u>
Giros a la Izq. = $(42 + (8 \times 1.5)) \times 1.6 = 86.4$; aprox. a 86
<u>Movimiento 2</u>
Rectos = $362 + (41 \times 1.5) = 423.5$, aprox. a 424
Giros a la Der. = $(51 + (4 \times 1.5)) \times 1.4 = 79.8$ aprox. a 80
<u>Movimiento 3</u>
Giros a la Izq. = $(142 + (10 \times 1.5)) = 423.5$; aprox. a 424
<u>Movimiento 4</u>
Rectos = $537 + (45 \times 1.5) = 604.5$, aprox. a 605
Giros a la Der. = $(62 + (10 \times 1.5)) \times 1.1 = 172.7$ aprox. a 173
<u>Movimiento 5</u>
Giros a la Izq. = $(64 + (7 \times 1.5)) \times 1.6 = 119.2$ aprox. a 119
<u>Movimiento 6</u>
Rectos = $249 + (25 \times 1.5) = 286.5$ aprox. a 287
Giros a la Der. = $(188 + (14 \times 1.5)) \times 1.4 = 292.6$; aprox a 293
<u>Movimiento 7</u>
Giros a la Izq. = $(174 + (13 \times 1.5)) \times 1.1 = 212.9$, aprox. a 213
<u>Movimiento 8:</u>
Rectos = $805 + (109 \times 1.5) = 968.5$ aprox. a 969
Giros a la Der. = $(54 + (5 \times 1.5)) \times 1.4 = 86.1$; aprox. a 86

Otro método para determinar los vehículos equivalentes de los vehículos que giran a la izquierda se muestra en el cuadro 10.6. Este método toma en cuenta el impacto de los volúmenes opuestos. En la medida que el flujo opuesto a los giros a la izquierda aumenta, en esa misma medida aumenta la demora del vehículo que gira a la izquierda; consecuentemente, el valor de equivalencia aumenta.

Cuadro 10.6
Factores de Equivalencia para Vehículos que giran a la Izquierda

Giros a la Izq.	Fase a la Izq.	Volúmenes Opuestos (vph)	Veh. Equival. por Veh. a Izq.
Giros a la Izq. mas Rectos en un (1) Carril	No	0 - 299	1.0
		300 - 599	2.0
		600 - 999	4.0
	Si	todos	1.2
Carril Exclusivo para Giros a la Izquierda	No	0 - 299	1.0
		300 - 599	2.0
		600 - 999	4.0
		1000 +	6.0
	Si	Todos	1.05

Después de calcular los vehículos equivalentes para cada afluente, estos se dividen entre el número de carriles correspondiente para obtener el volumen promedio por carril tal y como se indica en la Figura 10.21.

B. Identificación de los Volúmenes Críticos por Carril

Los volúmenes críticos por carril son los volúmenes equivalentes mas pesados para cada fase. Basado en esto, los volúmenes críticos por carril son:

Fase 1 213 vph
 Fase 2 528 vph
 Fase 3 333 vph
 Total 1074 vph

Una vez que la suma de volúmenes críticos ha sido determinada, se desea obtener una indicación de como el semáforo va a satisfacer a la demanda. El cuadro 10.7 relaciona la suma de volúmenes críticos por carril a niveles de servicio.

Cuadro 10.7.
Niveles de Servicio para la Suma de Volúmenes Críticos por Carril

Nivel de Servicio	Condición del Trafico	Suma Máxima de Volúmenes Críticos por Carril		
		Dos Fases	Tres Fases	Fases Múltiples
A	Estable	900	855	825
B	Estable	1050	1000	965
C	Estable	1200	1140	1100
D	Inestable	1275	1200	1175
E	Capacidad	1500	1425	1375

En la intersección que se está analizando, se logra un nivel de servicio "C". Un nivel de servicio C debe ser el objetivo del diseño de la semaforización, con un NDS "D" como mínimo. Una revisión de la eficiencia usando los volúmenes de la Figura 10.21 y los valores del cuadro 10.6a, el porcentaje de tiempo verde requerido se determina:

φ 1	213/1100 = 0.19
φ 2	528/1200 = 0.44
φ 3	333/1200 = 0.28
Total	0.91

En este ejemplo, la cantidad de tiempo verde requerido es levemente mayor de 0.90, por lo tanto se espera una pérdida de eficiencia ocasional.

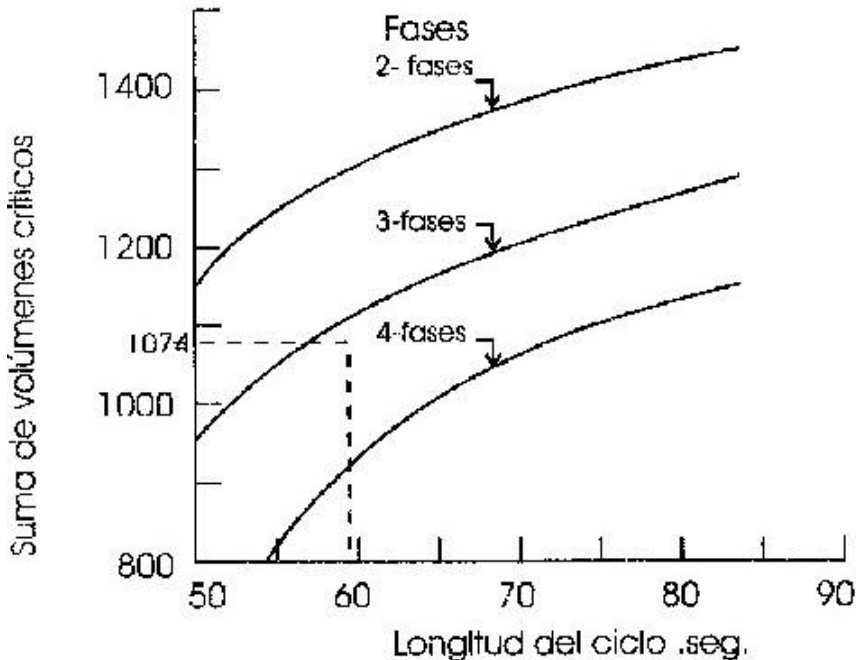
C. Determinación de la Longitud del Ciclo

La determinación del ciclo se hace usando la suma de volúmenes críticos por carril y la Figura 10.22. Entrando el gráfico con el volumen crítico calculado de 1074 vph se obtiene un ciclo de 60 seg. para tres fases.

Figura 10.22. Óptima longitud de ciclo para semáforos de 2, 3 y 4 fases.

D. Determinación de la Longitud de las Fases

El siguiente paso es dividir el ciclo de acuerdo a la demanda de tiempo verde. La siguiente fórmula da la longitud de la fase:



$$\text{Long. Fase} = \frac{(\text{Vol. Crit. por Carril para esa Fase}) \times 100}{\text{Suma de Volúmenes Críticos}}$$

Usando la fórmula anterior:

$\phi 1 = 213/1074 \times 100 = 19.8 \%$ del ciclo, aprox. 20 % = 12 segundos
 $\phi 2 = 528/1074 \times 100 = 49.1 \%$ del ciclo, aprox. 49 % = 29.4 segundos
 $\phi 3 = 333/1074 \times 100 = 31.0 \%$ del ciclo, = 18.6 segundos
Total 60 segundos

Por lo general, la fase mínima para un movimiento principal (recto) es de 15 segundos y la fase mínima para un movimiento menor (giro a la izquierda) es de 7 segundos.

E. Tiempo Requerido por los Peatones

Es necesario proveer tiempo suficiente para que los peatones crucen la calle con seguridad. La manera en que se indica el paso de peatones varía de agencia en agencia. Sin embargo, por lo general, la señal de "Pase" se da por un intervalo de 7 segundos, suficiente para que el peatón comience a cruzar la calle. La señal de "Pase" intermitente se da por un intervalo de tiempo suficiente para que el peatón cruce la calle. La velocidad del peatón es de 1.2 mt/seg.

Basado en lo discutido anteriormente, tenemos que los requerimientos por los peatones son:

Calle El Parque: 7 seg. + 10.5 seg. = 17.5 segundos
4^a Avenida: 7 seg. + 13.0 seg. = 20 segundos

Los peatones cruzan la Calle El Parque durante la $\phi 2$ y cruzan la 4^a Avenida en la fase $\phi 3$. Las fases anteriormente calculadas son:

$\phi 1$ 12 seg (a la izq.)
 $\phi 2$ 29.4 seg. (ok)
 $\phi 3$ 18.6 seg. (muy corto)

Es necesario proveer más tiempo verde para la fase 3. Usando un ciclo de 65 segundos, los nuevos tiempos son:

$\phi 1 = 213/1074 = 13$ seg.
 $\phi 2 = 528/1074 = 32$ seg.
 $\phi 3 = 333/1074 = 20$ seg.
Total 65 seg.

F. Intervalos de Desalojo (Amarillo)

Los intervalos de amarillo dependen de la velocidad con la cual los vehículos llegan al afluente. Recomendaciones para los amarillos se presentan a continuación:

Velocidad del 85 percentil	Amarillo (seg.)
bajo 30 KPH	3.0
entre 30 y 50 KPH	3.5
entre 50 y 65 KPH	4.0
entre 65 y 80 KPH	4.5
entre 80 y 100 KPH	5.0

Asumiendo que la velocidad de la intersección del ejemplo es menor a los 30 KPH, usaremos un amarillo de 3 segundos. Por lo tanto, los verdes del semáforo serán:

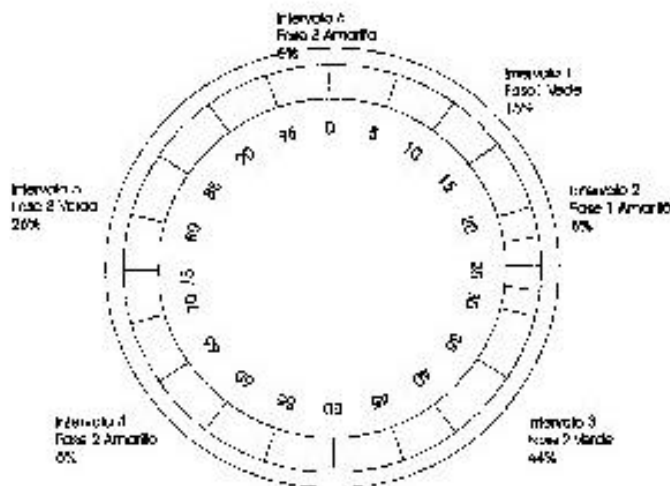
	Fase 1	Fase 2	Fase 3
Long. de fase	13.0	32.0	20.0
- Amarillo	3.0	3.0	3.0
Tiempo verde (seg)	10.0	29.0	17.0

Los tiempos en controladores electromecánicos se colocan en función de porcentajes del ciclo. Por lo tanto:

- Fase 1 Verde: 15%
- Fase 1 Amarillo: 5%
- Fase 2 Verde: 44%
- Fase 2 Amarillo: 5%
- Fase 3 Verde: 26%
- Fase 3 Amarillo: 5%

La figura 10.23 ilustra el funcionamiento de controladores electromecánicos. Los controladores de estado sólido se ajustan acorde a las instrucciones en el manual para su uso.

Figura 10.23. Ejemplo de Dial de Tiempos



Determinación de Tiempos de las Fases en Semáforos Actuados

La discusión a continuación es para equipos típicos actuados. El manual de cada controlador debe ser consultado cuando se requieran ajustes.

El equipo que se utiliza para semáforos actuados es mas complejo que el de tiempo fijo. Sin embargo, el ajuste de tiempos es bastante simple, ya que no se hace en porcentajes del ciclo sino en segundos. El verde de semáforos actuados tiene tres ajustes: intervalo inicial, intervalo de vehículos o extensión, y extensión máxima.

A. Intervalos Iniciales y de Vehículos (extensión)

El intervalo inicial es el primer segmento de verde y es el tiempo durante el cual el trafico se pone en movimiento. Este intervalo toma en cuenta el tiempo de reconocimiento y reacción (por lo general 4 segundos). Además, debe proveer para el desalojo de los vehículos que estén almacenados entre el detector y la línea de pare. Una regla general es la de proveer de 2 a 3 segundos de tiempo por cada vehículo almacenado.

El intervalo de vehículos o extensión debe satisfacer las dos condiciones siguientes:

1. Tiene que ser lo suficientemente largo como para que el vehículo viaje del detector hasta la línea de pare o hasta la mitad de la intersección si la calle perpendicular es ancha.
2. Debe ser tan larga como el intervalo de tiempo entre dos vehículos que se considere seguro.

Por lo general se usan 3 segundos para un intervalo de vehículos.

El tiempo mínimo que un semáforo actuado permanece en verde es de un intervalo inicial mas un intervalo de vehículo, a menos que un vehículo pase sobre el equipo de detección. Si un vehículo activa el detector, entonces el verde puede ser extendido hasta un limite: el tiempo verde máximo.

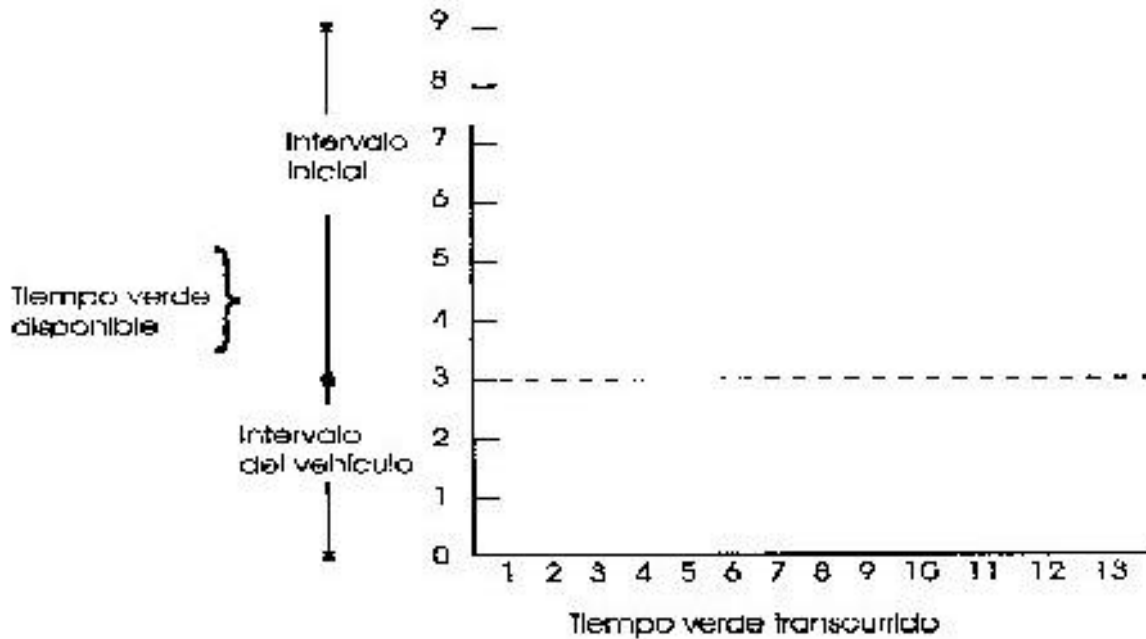
B. Tiempo Verde Máximo

Como su nombre lo indica, es el tiempo máximo que un semáforo en una fase actuada permanece en verde cuando hay vehículos esperando en otros afluentes.

Existen dos tipos de máximo, dependiendo del equipo que se adquiera. El primero es la "extensión máxima" o la longitud de tiempo máxima que se extenderá el verde, contado desde el inicio del intervalo de vehículo o desde el momento en el cual hay una actuación en otra fase (el que sea mas tarde). El otro tipo es llamado el "verde máximo" o simplemente "máximo". Como lo indica su nombre, este tipo es el máximo tiempo verde total que suministra el semáforo, contado a partir del principio del verde o desde que se recibe una actuación de otra fase. Este tipo incluye el intervalo inicial. Para mas información sobre un equipo en particular, ver los manuales de los equipos.

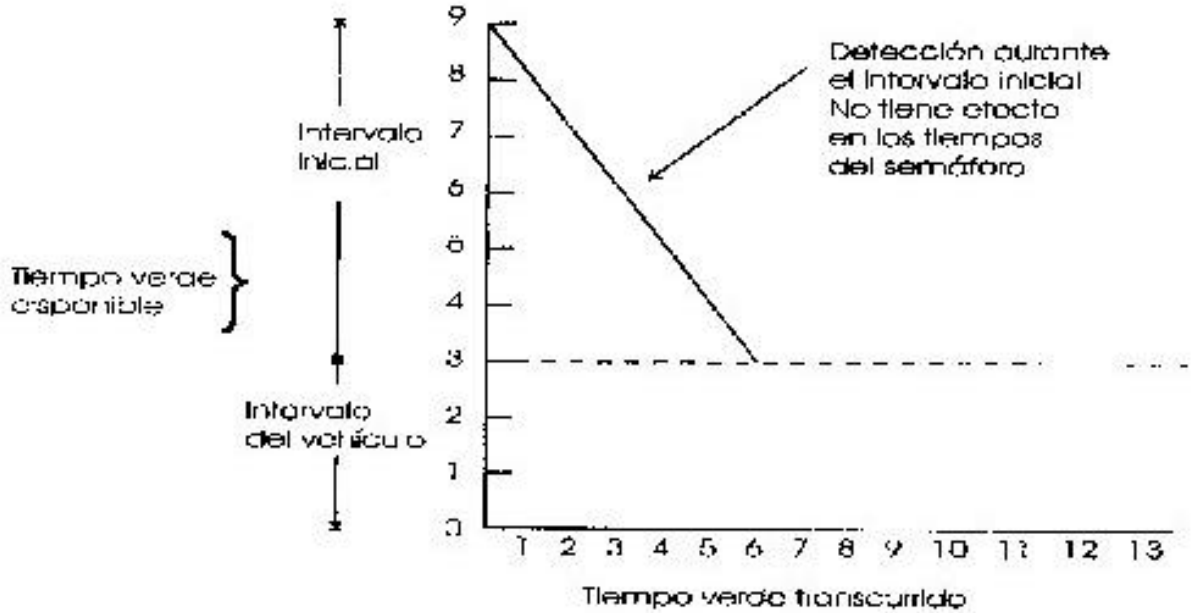
Para establecer los ajustes de tiempo máximo en una fase se utiliza el mismo procedimiento de semáforos de tiempo fijo. El funcionamiento del intervalo inicial, el intervalo o extensión de vehículo y el tiempo verde máximo se ilustra a través de la figuras 10.24A a la 10.24D.

Figura 10.24A. Diagrama Conceptual para Tiempos de Semáforos Actuados



En la Figura 10.24A tenemos un intervalo inicial y un intervalo de vehículo (extensión) como el tiempo verde disponible. Este es el tiempo mínimo de tiempo que una fase permanece en verde. Después que la fase empieza comienza un conteo regresivo del tiempo verde disponible. Si ningún vehículo pasa sobre el detector de esa fase durante el intervalo de extensión de vehículos entonces el semáforo “gap out”, el tiempo verde disponible va a cero y el semáforo cambia a amarillo y después a rojo, como se indica en las figuras 10.24B y 10.24C.

Figura 10.24B. Diagrama Conceptual para tiempos de semáforos actuados.



Sin embargo, cada vez que un vehículo es detectado en la fase que tiene el verde, el controlador regresa al intervalo de vehículo o extensión.

El proceso descrito anteriormente continua mientras haya vehículos que lleguen a los detectores o hasta alcanzar el verde máximo (Figura 10.24D).

Figura 10.24C. Diagrama Conceptual de Semáforos Actuados.

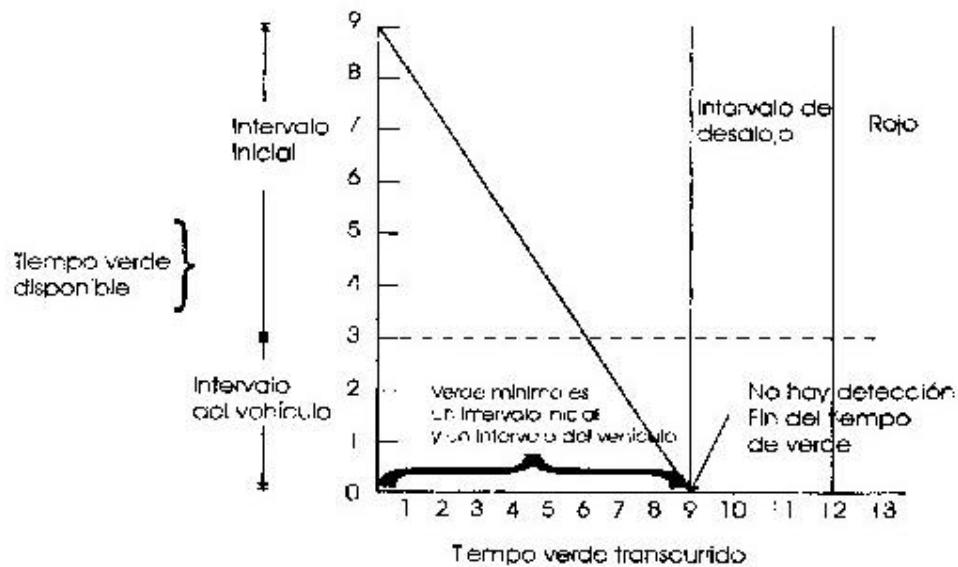
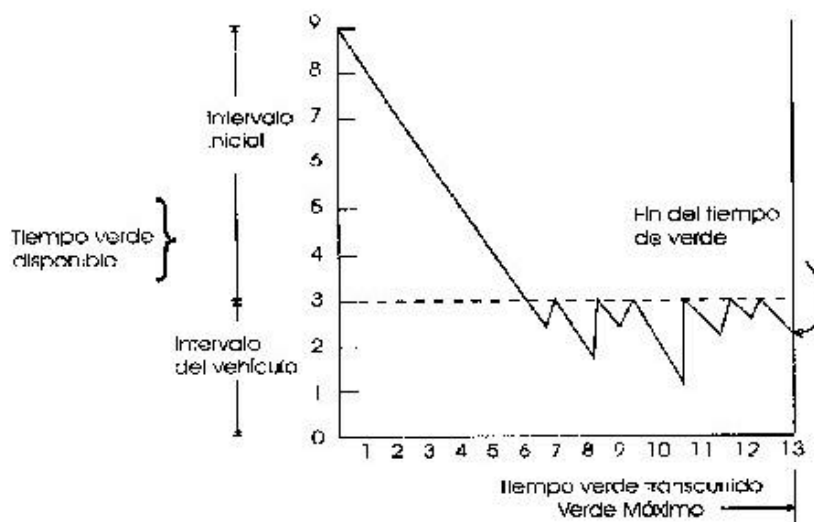


Figura 10.24 D. Diagrama Conceptual de Semáforos Actuados



C. Intervalo de Desalojo para Peatones.

Los intervalos para vehículos se calculan de la misma forma en semáforos actuados que en semáforos de tiempo fijo. Sin embargo, el intervalo de desalojo de peatones se calcula de forma diferente.

El intervalo de peatones se calcula basado en la distancia entre la guarnición más cercana y el centro del carril más lejano en el acceso a cruzar. Al valor obtenido se le subtrae un intervalo de vehículo (extensión) para determinar el intervalo de peatones para equipos actuados.

Intervalo de Peatones Calculado	18 seg.
Intervalo de Extensión de Vehículos	3 seg.
Intervalo de Peatones para Semáforos Actuados	15 seg.

D. Ajustes de Tiempos

Los procedimientos anteriormente descritos ofrecen el punto de inicio para la determinación de los tiempos de semáforos actuados. Después que la instalación se pone en operación son necesarios una serie de ajustes en campo para afinar la operación. Es necesario establecer un programa de revisión periódica de los tiempos, ya que los patrones de tránsito y volúmenes son variables.

Características de los Equipos

El ajuste de tiempos de semáforos actuados es complicado debido a la falta de uniformidad entre los equipos en el mercado. Las mismas características operacionales son identificadas con nombres diferentes por diversos fabricantes. Es indispensable consultar los manuales de los fabricantes para ver que terminología se usa para las características operacionales que se describen a continuación.

Intervalo Inicial

El intervalo inicial debe ser lo suficientemente largo para permitir al tránsito que se mueva sobre el detector. Para mover la cola de vehículos sobre el detector se debe tomar en cuenta la demora inicial (tiempo perdido) más la distancia entre el detector y la línea de alto. El tiempo perdido por vehículo se ilustra en el Cuadro 10.8

Cuadro 10.8
Tiempo Perdido o Demora Inicial por cada vehículo en la cola

Posición en la Cola	Intervalo de Salida (seg.)	Demora Inicial (seg.)
1	3.7	1.7
2	3.2	1.2
3	2.7	0.7
4	2.3	0.3
5	2.1	0.1
6 o más	2.0	0.0
Total		4.0 seg.

Por lo tanto, si un detector esta ubicado a 15 mts de la línea de alto (equivalente a la longitud de dos vehículos), el intervalo inicial mínimo es de 3.7 seg. más 3.2 seg., 6.9 seg. en total. Si el detector esta a 30 mts. de la línea de alto, entonces el intervalo inicial se calcula con la siguiente ecuación:

$$t = 4 + 2 \times N$$

donde, N = número de vehículos entre el detector y la línea de alto

t = intervalo inicial mínimo

Intervalo de Vehículo o Extensión del Verde

La determinación de la longitud de la extensión de vehículos esta basada en el tiempo que requiere un vehículo para viajar desde el detector hasta la línea de alto. Esta porción del intervalo de extensión es conocido como "Intervalo de detección" (passage). La segunda porción del intervalo de extensión esta basado en el intervalo de tiempo entre dos vehículos consecutivos.

Para la operación de semáforos actuados se usa un tiempo de percepción/reacción de 3 segundos, mayor que el comúnmente usado de 1.5 a 2.0 segundos. El tiempo adicional es para proveer un margen de seguridad.

A. Zona de Dilema: Es una zona en la cual un vehículo no puede pararse o desalojar la intersección con seguridad. Esto se ilustra con el siguiente ejemplo:

Velocidad Prevalciente (V)= 80 KPH
Coeficiente de fricción (f) = 0.3 (condiciones húmedas)
Tiempo de percepción y reacción (P/R) = 3 seg.

Distancia de Frenado = $0.278 (P/R)(V) + V^2/252f$
DF = 150 mts (aprox).

La distancia recorrida por un vehículo a 80 KPH durante un amarillo (intervalo de desalojo) de 5 segundos es;

$D = 80 \text{ KPH} \times 1000 \text{ mts/Km} \times 1/3600 \text{ seg/hr} \times 5 \text{ seg.} = 111 \text{ mts. aprox } 110 \text{ mts.}$

Si la intersección tiene un ancho de 18 mts, entonces la zona de dilema (ZD) es:

$ZD = 150 - 110 + 18$ (long. de la intersección) $+ 7$ (long. de un vehículo) $+ 3$ (distancia entre la línea de alto y la intersección) = 68 mts.

Eso quiere decir que un vehículo que este entre 150 mts y 82 mts de la intersección no puede desalojar la intersección con seguridad, por lo tanto se requiere más tiempo para el intervalo de desalojo usando una fase de todo rojo.

Verde Máximo

Se calcula de la misma forma que para semáforos de tiempo fijo.

Intervalo de Desalojo (Amarillo)

Esta basado en la velocidad de llegada a la intersección. Se usan los mismos valores discutidos para semáforos actuados.

Intervalo para Peatones

Se calcula igual que para semáforos actuados. Los ajustes en el controlador se hacen restándole un (1) intervalo de vehículo o extensión.

Controladores NEMA de Estado Sólido

Definiciones

Verde Mínimo (Minimum Green): tiempo verde mínimo que siempre se suministra.

Intervalo de detección (Passage): tiempo requerido para viajar del detector a la línea de alto a la velocidad del flujo de tránsito.

Brecha Mínima (Minimum Gap): el intervalo de tiempo entre vehículos necesario para mantener la fase en verde después que el verde mínimo ha colapsado.

Tiempos del Controlador NEMA

A. Verde Mínimo: Tiempo necesario para desalojar la cola de vehículos entre el detector y la línea de alto.

Verde Mínimo = $4 + 2 \times N$, donde N = número de vehículos almacenados entre el detector y la línea de alto.

B. Intervalo de detección (Passage): es el tiempo requerido para pasar del detector hasta la línea de alto. Debería ser calculado con una velocidad de por lo menos 5 KPH menor a la velocidad prevaleciente, de manera de tener un margen de seguridad.

C. Brecha Máxima para mantener la fase verde: intervalos de 1.9 a 2 seg. son los más pequeños que se consiguen en el flujo de tránsito. Intervalos de 5 seg se consiguen solo en condiciones de flujo muy bajas. Por lo tanto un valor de 2.5 a 4 segundos puede ser usado. Valores más pequeños deben ser usados en condiciones de flujo altas. Los valores más altos son para condiciones de flujos bajos.

D. Verde Máximo: Por lo general se puede usar la misma metodología usada para semáforos de tiempo fijo. También, utilizando el hecho que el flujo de tránsito sin restricciones se describe con una distribución de Poisson, el tiempo verde máximo se puede determinar de la siguiente forma:

Ciclo = 120 seg. Volumen = 560 vph. Número de Carriles: 2.

Ciclos por hora = $3600/120 = 30$ ciclos por hora

Volumen Promedio por carril y por ciclo = $560/2 \times 30 = 9.6$ veh/ciclo x carril

95 Percentil = 15.8 aprox. 16 vehículos

Verde Máximo = $4 + 2 (N) = 36$ segundos.

Este proceso se repite para cada fase y se determina el valor del verde más amarillo. La longitud de ciclo resultante se compara con los 120 seg, asumidos y el proceso se repite hasta que el valor asumido y el calculado sean comparables.

PROCEDIMIENTO PARA EL DISEÑO DE TIEMPOS PARA UN CONTROLADOR ACTUADO VOLUMEN/DENSIDAD DE OCHO FASES, DUAL RING

1. INICIAL (INITIAL):

Se recomienda sea 10 segundos (expectativas del conductor). Si el detector está a una distancia mayor, de manera que se requiera más de 10 segundos para desalojar la cola que se forma entre el detector y la línea de alto, se usa un intervalo inicial variable.

2. SEC./ACT.

Durante la fase roja (cuando el acceso esta en rojo), el controlador cuenta los vehículos que llegan al acceso. El verde mínimo que se le da a la fase verde (después del rojo) es igual al número de actuaciones por S/A.

$S/A = (\text{Tiempo Requerido para desalojar el almacenamiento entre el detector y la línea de alto}) / (\text{Vehículos Almacenados})$

$$S/A = [4 + 2(N-1)] / N ; \text{ en segundos}$$

3. Extensión (Passage):

$$P = (\text{Distancia entre detector y línea de alto}) / (\text{Velocidad en el acceso}); \text{ segundos}$$

4. Inicial Máximo (Maximum Initial):

Es el tiempo inicial de verde máximo. Tiempo requerido para desalojar el almacenamiento entre el detector y la línea de alto.

Para giros a la izquierda:

$$MI = 4 + 2.1 (N-1)$$

Para volumen de frente:

$$MI = 4 + 2 (N-1)$$

5. Máximo 1

Verde máximo para una fase. Se calcula con el mismo procedimiento de semáforos de tiempo fijo.

En la práctica:

$$M = 1.5 (\text{verdes para el ciclo óptimo para el pico AM})$$

$$M_i = 1.5 \left[\frac{\left(\frac{v}{s} \right)_i}{\left(\frac{v}{s} \right)_{ci}} \right] (C_0 - L)$$

6. Máximo 2

Verde máximo (hora PM). Se calcula igual al verde para semáforos a tiempo fijo.

7. Amarillo:

Se calcula de la misma forma que para semáforos actuados.

Si Amarillo \leq 4.5 seg. ; Amarillo = Amarillo calculado

Si Amarillo $>$ 4.5 seg., Amarillo = 4.5 seg. lo demás en todo rojo.

8. Tiempo antes de Reducción (Time before Reduction, TBR):

$$TBR = 0 \text{ seg.}$$

9. Rojo: todo rojo, igual que en semáforos de tiempo fijo, prolongación del amarillo.

10. Tiempo para Reducir (Time to Reduce, TTR)

$$TTR = 0$$

11. Pase para Peatones

Pase = 4 segundos, lo demás en intermitente "Apúrese", solo para fases de frente.

12. Brecha Mínima (Minimum Gap):

Para giros a la izquierda: 2.1 seg.

Para movimientos de frente: 2.0 seg.

13. Apúrese (Flash don't walk, FDW)

FDW = (Distancia a Caminar/1.2) - Amarillo, solo en fases recto.

14. Recall (RCL)

0 - nada

15. Modo No actuado

Off.

9. SISTEMAS DE SEMÁFOROS

Concepto de Sistema

Un sistema de control de tránsito es un conjunto de métodos, técnicas, y equipos usados para coordinar el flujo de tránsito dentro de una área definida o a lo largo de una vialidad. El objetivo principal de un sistema de tránsito es el de proveer un movimiento continuo del tránsito a través de intersecciones semaforizadas con un mínimo de demoras. Este objetivo se logra proveyendo a cada semáforo con un plan de tiempos apropiado que también trabaje en conjunto con todas las intersecciones semaforizadas del sistema. Los planes de tiempos indicados consisten de las siguientes partes:

- Ciclo del Sistema: una longitud de ciclo específico que se adopta para todo el sistema.
- Reparto de Tiempos: a cada intersección semaforizada del sistema se le asigna un reparto de tiempo que depende de la demanda de tránsito. El reparto de tiempos se refiere a la porción del ciclo que se le asigna a cada fase.
- Desfase: a cada intersección del sistema se le asigna un desfase que se relaciona con el inicio del verde en la intersección en particular, con la base de tiempo en la

intersección con el controlador maestro. El desfase, indicado en segundos, también controla la velocidad a la cual el tránsito puede viajar de intersección en intersección sin detenerse.

Las longitudes de ciclo, los repartos de tiempo y desfases pueden variar proveyendo diferentes planes para demandas variables. Por lo general, los sistemas de semáforos deben tener diferentes planes de tiempo para diferentes horas del día.

Tipos de Sistemas de Control de Semáforos

Existen diversos métodos y equipos que conforman un sistema de control de tránsito por semáforos. Por lo general, la mayoría de los sistemas están comprendidos entre los que se mencionan a continuación:

Sistemas no interconectados: los desfases de los controladores esclavos locales con respecto al controlador base son asignados manualmente en cada controlador. Una vez que se establece la coordinación, el movimiento del tránsito de manera progresiva depende de la habilidad de cada controlador en las intersecciones individuales; de mantener los tiempos apropiados.

Sistemas Coordinados de Tiempo Base: este tipo de sistema ofrece coordinación sin necesidad de interconectar físicamente los controladores. Los controladores de tiempo base son relojes muy precisos que pueden ser programados para contener diversos planes de tiempo de acuerdo a la hora del día, día de la semana, incluyendo días de fiesta. La coordinación se mantiene asegurando que todos los controladores tengan exactamente la misma hora.

Sistemas Interconectados de Tiempo Fijo: este sistema utiliza el mismo tipo de equipo descrito anteriormente para sistemas no interconectados, con la diferencia que en este caso están interconectados por medio de cables de semáforos. El número de planes de tiempo disponibles depende del número de diales, el número de desfases y el número de repartos de tiempo que permita el sistema. Un controlador dentro del sistema actúa como controlador maestro y actúa como el coordinador de tiempo para los otros controladores del sistema.

Sistemas Dinámicos: por lo general, este es un sistema interconectado de controladores de tiempo fijo que utiliza un controlador maestro que especifica la longitud del ciclo y los desfases requeridos. Se colocan detectores dentro del sistema para muestrear los volúmenes de tránsito (direcciones) para determinar cual de las longitudes de ciclo disponible debería estar en operación. El controlador maestro debe ser un computador.

Sistemas Actuados e Interconectados: por lo general este es un sistema pequeño que consiste de dos o más controladores actuados con uno que trabaja como el maestro del sistema. La capacidad de este tipo de sistemas para desfases es limitada. El controlador maestro puede ser flexible a la demanda o una combinación de relojes de tiempo.

Sistemas de Control de Semáforos por medio de Computadores Digitales: este es el más sofisticado de los sistemas de control de semáforos. Usa un computador digital para controlar, operar y supervisar el sistema de control de semáforos. Se dispone de planes de tiempo que pueden ser arreglados de diversas formas dependiendo de necesidades específicas. El

sistema consiste en una computadora central, una red de comunicaciones (cableado, teléfono, radio o combinación), y equipo de campo (controladores, detectores, etc.).

Tiempos para Sistemas de Semáforos Simples

Sistemas de semáforos de tiempo fijo se consiguen en los centros de ciudades o en arterias de grandes ciudades. Los patrones de tiempos para este tipo de sistemas pueden ser catalogados como simultáneos, alternados o progresivos.

Sistemas Simultáneos

En ese tipo de sistema, todos los semáforos a lo largo de una calle dan la misma indicación al mismo tiempo. Por lo general, este tipo de sistemas no es recomendado por que reduce la capacidad, incrementa la velocidad, o detiene gran parte del tránsito. Su uso es adecuado solo donde la distancia entre intersecciones son muy cortas, todas las intersecciones son semaforizadas y el volumen de tránsito en las calles principales es tan alto que requiera de la mayoría del verde.

Sistemas Alternados

En este tipo de sistema, un grupo de semáforos da indicaciones alternas a una determinada calle al mismo tiempo. Este tipo de sistemas tiene aplicaciones limitadas porque requiere un reparto del ciclo del 50%-50% que puede ser ineficiente para algunas intersecciones. Este tipo de sistema es adecuado para áreas centrales donde la distancia entre intersecciones es constante y las cuadras son completamente cuadradas, consiguiéndose en esos casos progresiones en todas las direcciones.

Sistemas Progresivos

Hay dos tipos de sistemas progresivos: simples y flexibles. El sistema progresivo simple es aquel en el cual las caras de los semáforos controlan las indicaciones de verde de acuerdo a un programa de tiempo predeterminado de manera que permita que un grupo de vehículos (pelotón o columnas) se mueva continuamente a una tasa de velocidad predeterminada, que puede variar en diversas partes del sistema.

Los sistemas progresivos flexibles permiten que los intervalos en cada instalación de semáforos se ajusten a los requerimientos de los volúmenes de tránsito en la intersección y que los inicios del verde en semáforos diversos puede ser independiente para obtener una eficiencia máxima en la intersección en particular.

Sistema Coordinado en Doble Sentido con Espacios Variables entre Cuadras

A continuación se presenta un método gráfico que puede ser usado para coordinar una serie de intersecciones semaforizadas con distancias variables entre ellas. El método fue ideado por J.H. Kell.

Para el método se usa un diagrama de espacio-tiempo en el cual la distancia se gráfica con respecto al tiempo. En el eje de las abscisas se coloca a escala las ubicaciones y distancias entre intersecciones. En el eje de las ordenadas se colocan las escalas de tiempo. Para ilustrar el procedimiento se realiza el siguiente ejemplo:

La figura 10.25A muestra los volúmenes para la Avenida Zulia en un segmento con 5 intersecciones. Las distancias entre intersecciones se muestran en las figuras 10.25 y 10.26. Para la determinación de los tiempos de progresión se siguen los siguientes pasos:

A. Se construye un diagrama de espacio/tiempo de la siguiente forma:

1. Generalmente, en un gráfico de dos dimensiones, se colocan las distancias a escala en el eje horizontal y el tiempo a escala en el eje vertical. Luego se colocan las intersecciones a escala y se dibujan ejes verticales en el centro de cada intersección (ver Figuras 10.25 y 10.26).
2. Se dibuja una línea de referencia horizontal a lo largo del diagrama (Fig. 10.26).
3. Se establece una longitud de ciclo a escala. Esta escala puede ser arbitraria, sin valor numérico. La longitud del ciclo se determina después de completar el procedimiento. Se recomienda que se use una escala donde la longitud del ciclo sea aproximadamente un cuarto de la longitud de la dimensión vertical del diagrama. En nuestro ejemplo la escala permite dos ciclos predeterminados completos (ver figura), basado en el procedimiento siguiente:

Longitud de Ciclo: Entre 60 y 80 seg.

Distancia Recorrida: 3370 pies

Velocidad de Diseño: 30 mph

Tiempo de viaje estimado = $\text{Dist.}/\text{Vel.} = 3370 / 1.47 \times 30 = 76$ segundos

4. Se determina la división del ciclo en rojo y amarillo más verde. Es conveniente usar una división de ciclos promedio para la construcción del diagrama de espacio tiempo y luego ajustarlo a divisiones individuales. En nuestro ejemplo se usa un 67% de amarillo más verde, basado en los datos de volúmenes.
5. Las fases de los semáforos se colocan en el diagrama de manera que el punto medio de la fase (amarillo más verde o rojo, cualquiera de las dos) este centrado en la línea de referencia horizontal.

B. La construcción de las fases de semáforo o divisiones del ciclo se empieza en el extremo izquierdo del diagrama. El verde más amarillo o el rojo se centra en la línea de referencia. En nuestro caso centramos el verde más amarillo. Luego, la línea vertical que representa la intersección se divide en rojo, verde y amarillo, como se indica en la figura.

C. Se dibuja una línea de prueba a través del comienzo del primer verde. La línea tendrá una pendiente de $\frac{1}{2}$ a un $\frac{1}{3}$ de la longitud del ciclo por cada 1000 pies en el caso de una área central, o $\frac{1}{4}$ de ciclo por cada 1000 pies para arterias. En la figura 10.27 esta línea se denota como "A".

D. Las fases de semáforos se construyen para el segundo y tercer semáforo; centrando las fases verde más amarillo o rojo de manera que se coloque el principio del intervalo verde lo más cerca posible de la línea "A" (ver Figura 10.28). En esta figura el intervalo verde más amarillo o la fase roja se centra en la línea de referencia para la intersección

con la Calle 26. Si la línea de prueba pasa sobre el punto medio del intervalo verde, se debe centrar el otro color, y se debe dibujar una línea de prueba nueva desde el principio del verde en la Calle 29, tocando el fondo del intervalo verde en la Calle 26.

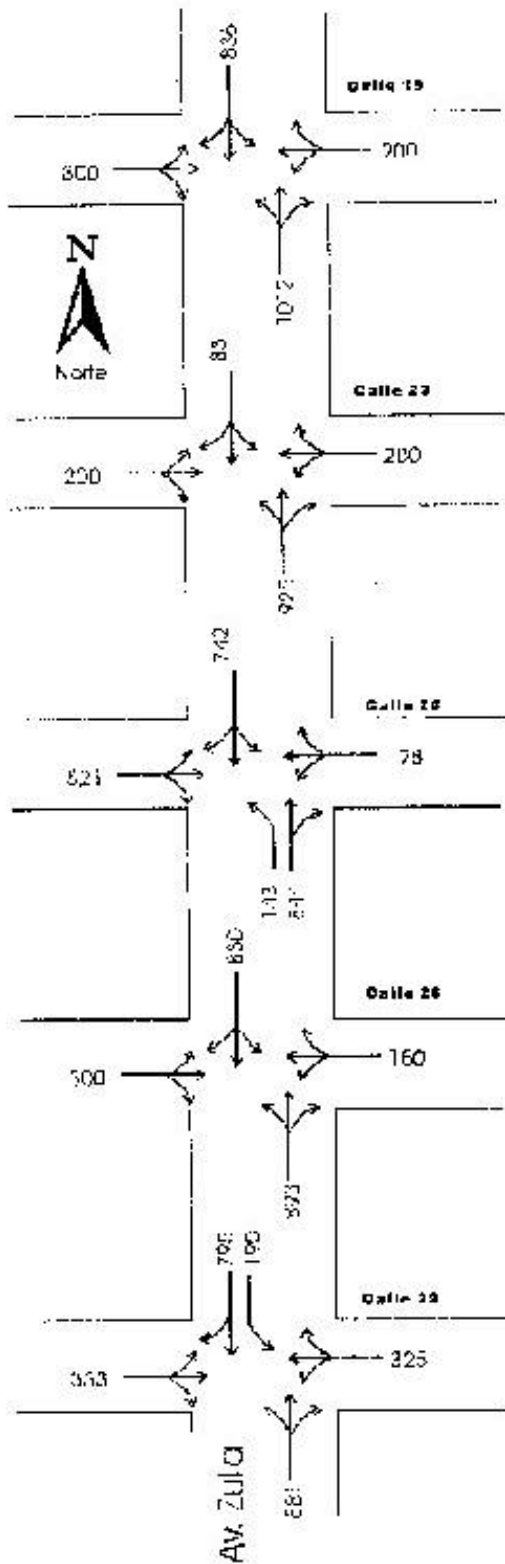
- E. Usando la línea de prueba, repetir el paso D para las otras intersecciones semaforizadas en el ejemplo, tal y como esta indicado en las Figuras 10.29 a 10.31.
- F. Cuando el proceso esta completo, la línea de prueba se convierte en la línea inferior de la banda de progresión. Se desea ahora establecer la longitud del ciclo (si no ha sido predeterminada) para suministrar una velocidad de progresión razonable. La pendiente final es la velocidad de progresión.
- G. La línea superior de la banda de progresión se construye paralela a la inferior (Figura 10.32) de manera que intercepte a todos los semáforos en el intervalo verde más amarillo. En nuestro ejemplo, el ancho de la banda esta controlado por el semáforo en la Calle 25. Con un ciclo de 60 segundos se obtiene un ancho de banda de 16.3 segundos a una velocidad de 30 kmph.
- H. Se construye la banda de progresión para la dirección opuesta. Esta banda es aproximadamente igual en ancho y pendiente que la primera. En nuestro ejemplo (Figura 10.33), la línea inferior de la banda esta controlada por el semáforo en la Calle 26. La línea superior esta controlada por los semáforos en las Calles 25 y 29.
- I. El diagrama espacio/tiempo completo se muestra en la Figura 10.33.

Sistema Coordinado en un Solo Sentido

Este método es usado para calles en un solo sentido o para progresiones preferenciales. Los pasos utilizados son:

- A. Las longitudes del ciclo se deben determinar.
- B. Seleccionar la velocidad de progresión.
- C. Preparar un diagrama de espacio/tiempo indicando las intersecciones semaforizadas en el eje horizontal.
- D. Una línea de construcción se dibuja con una pendiente igual a la velocidad de progresión deseada. Esta línea es la parte inferior de la banda de progresión.
- E. Las fases del ciclo se construyen en cada intersección de manera que el principio de la fase verde se coloque sobre la línea de construcción.
- F. La línea superior se traza paralela a la inferior. Si todas las fases son iguales, entonces el ancho de la banda es igual al amarillo más verde. Si las fases son diferentes, entonces la banda de progresión es igual al verde más amarillo más pequeño.
- G. Se miden los desfases a partir del gráfico.

Figura 10.25B. Volúmenes de Tránsito - Hora Pico - en la Av. Zulia



Intersección Con	C. Principal		C. Secundaria	
	Al Norte	Al Sur	Al Este	Al Oeste
Calle 19	1012	835	300	200
Calle 23	925	831	200	200
Calle 25	987	742	521	178
Calle 26	893	830	300	150
Calle 29	881	985	333	325

Figura 10.25A. Ejemplo de Progresión

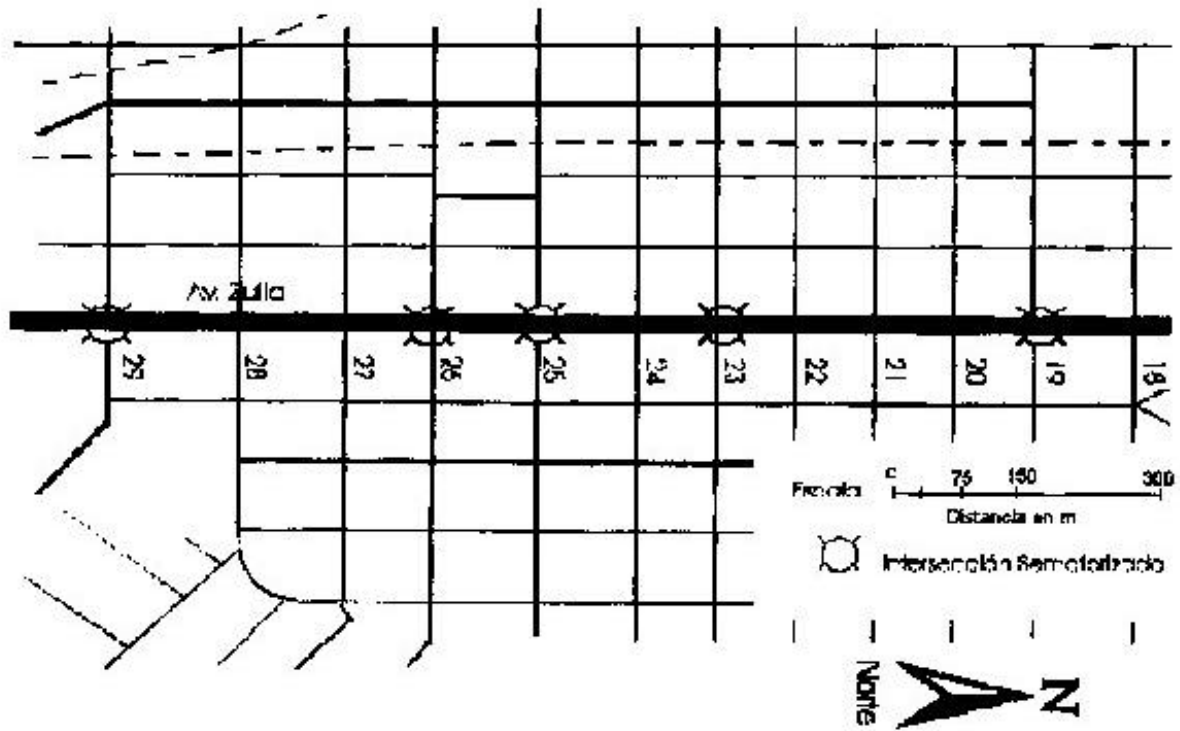


Figura 10.26. Esquema Básico para la Construcción del Diagrama Tiempo - Espacio

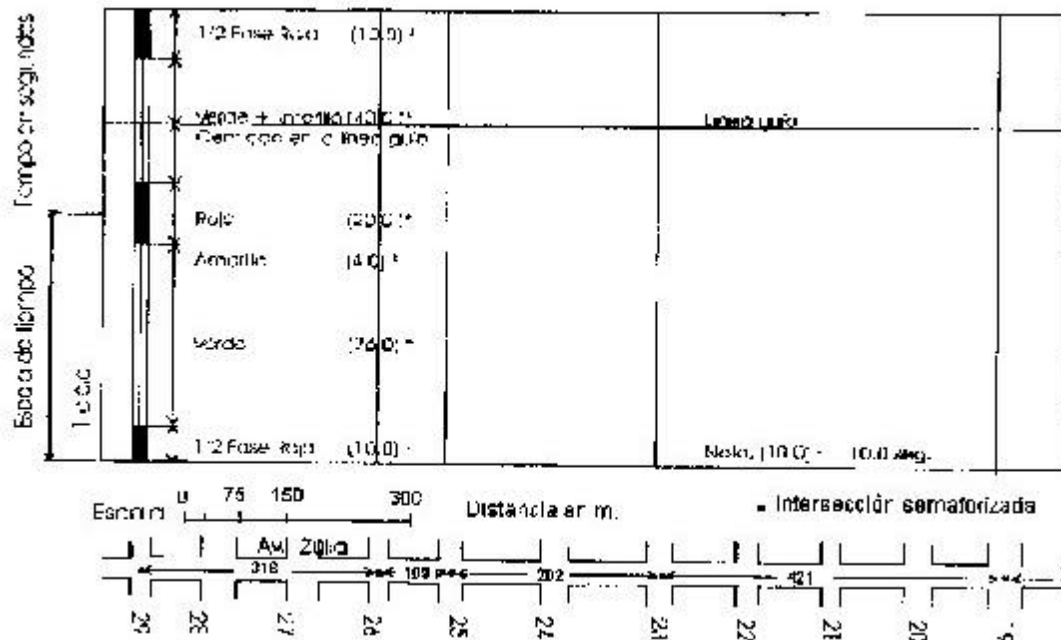


Figura 10.27. Fases del Ciclo en la Primera Intersección

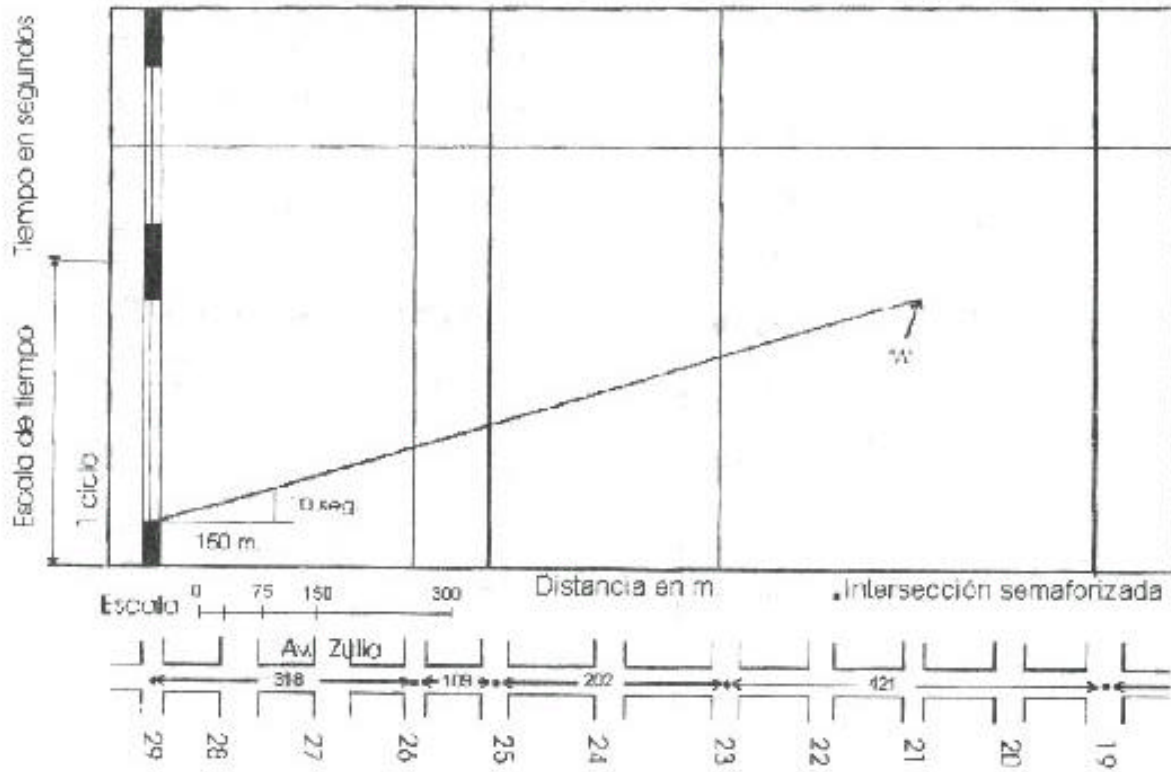


Figura 10.28. Fases del Ciclo en la segunda Intersección

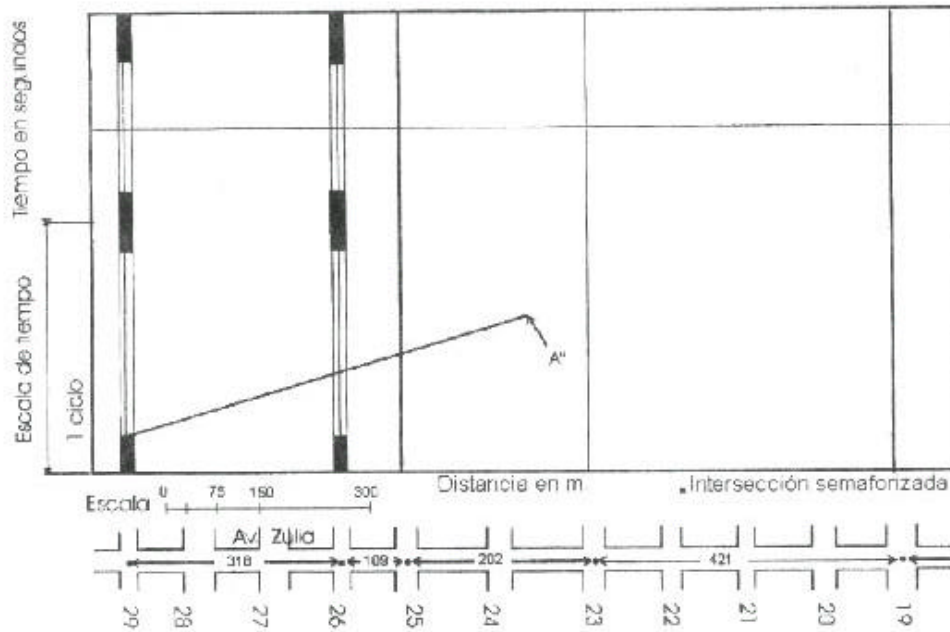


Figura 10.29. Fases del Ciclo en la Tercera Intersección

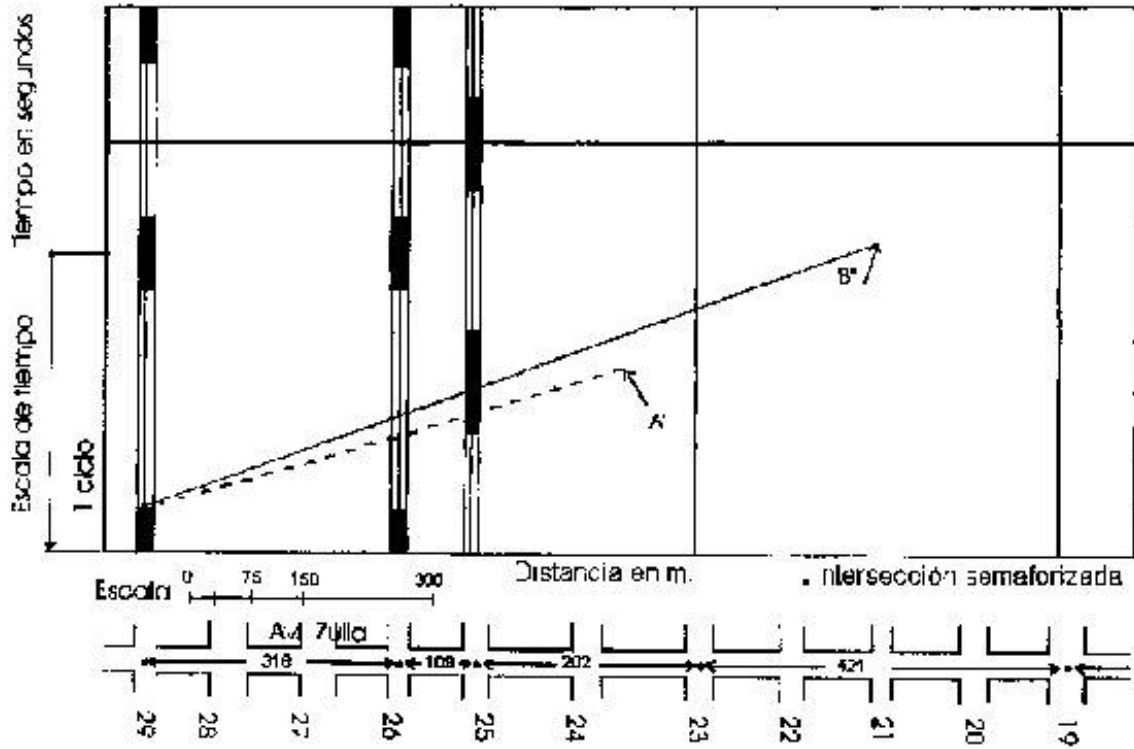


Figura 10.31. Fases del Ciclo en la quinta Intersección

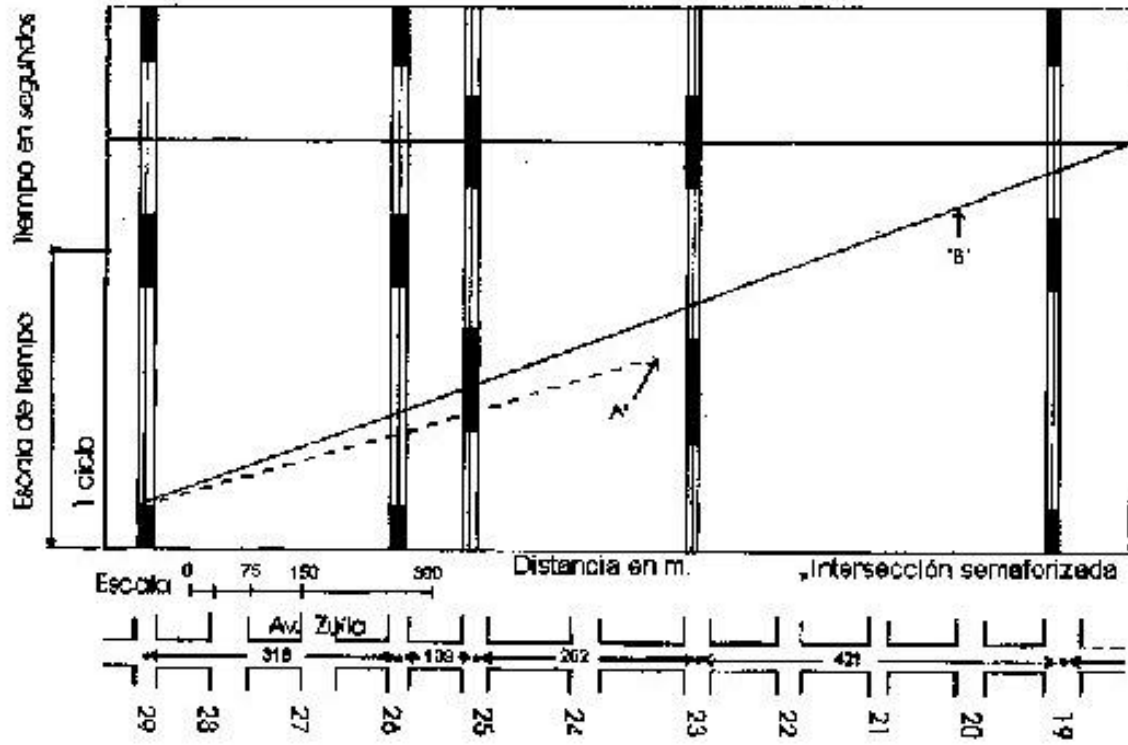


Figura 10.32. Esquema completo de las fases

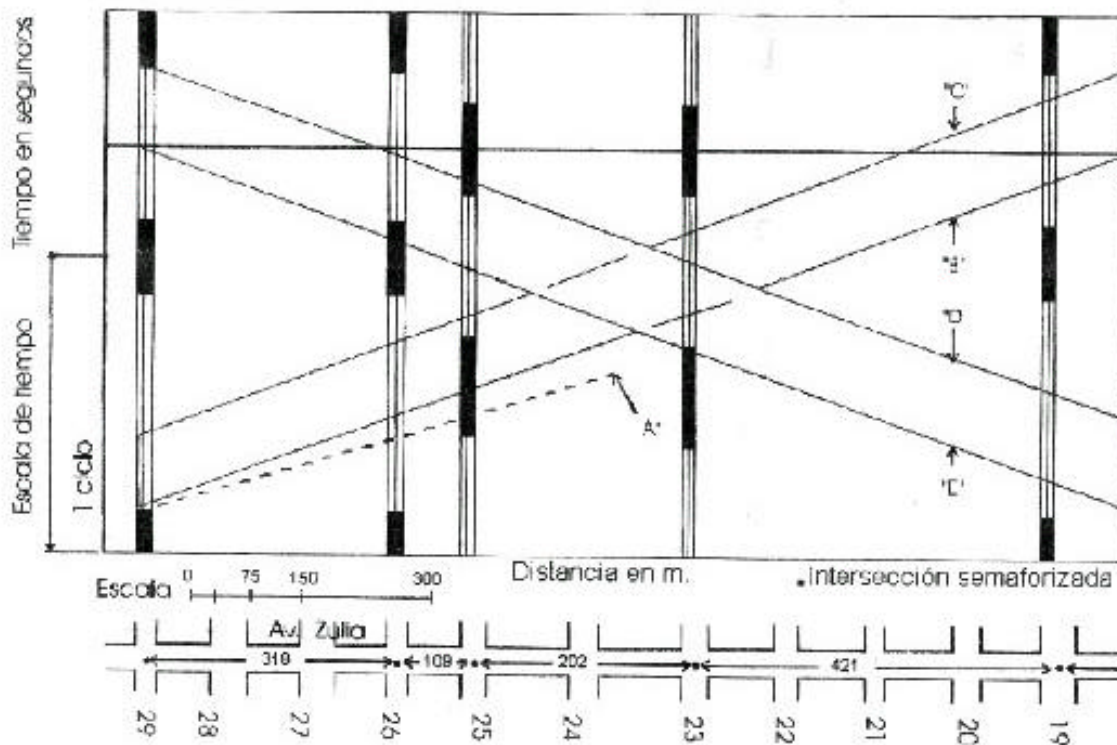


Figura 10.33. Diagrama completo Espacio - Tiempo

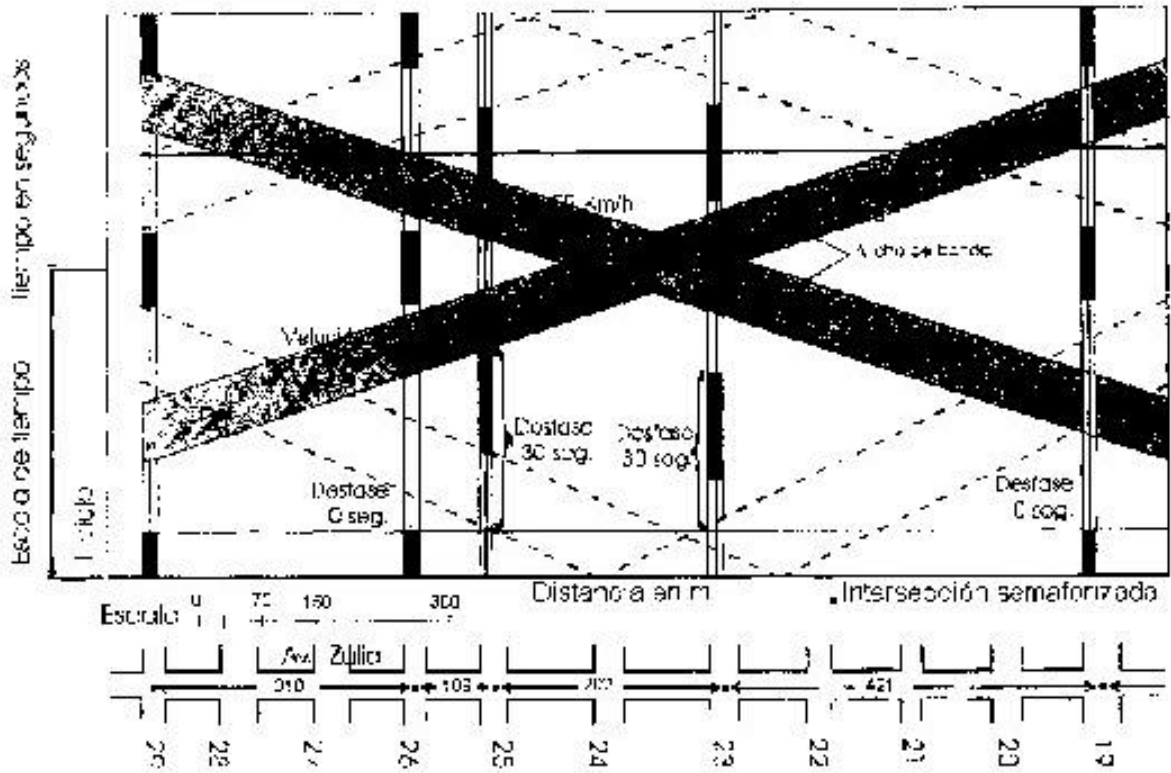
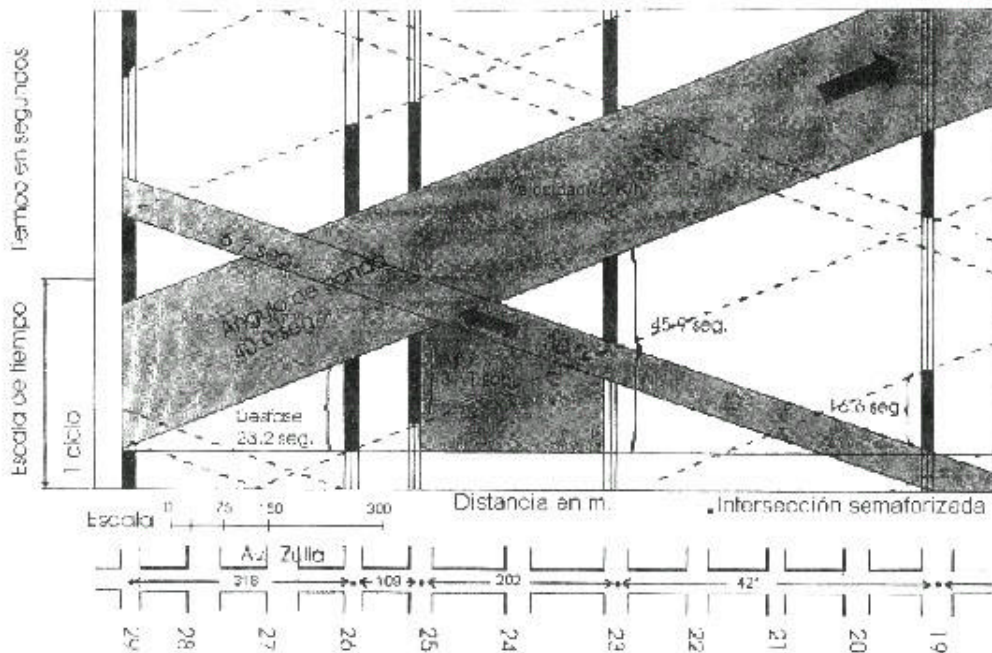


Figura 10.34. Diagrama Espacio - Tiempo Favoreciendo una dirección



10. TIEMPOS DE SEMÁFOROS PARA REDES CERRADAS

En los párrafos siguientes se discute un método manual para el cálculo de tiempos de semáforos en una red cerrada. Los semáforos en las esquinas de la red deben ser calculados de manera que el flujo continuo del sistema vaya a la velocidad deseada de progresión. En los párrafos siguientes se presenta una técnica para determinar la longitud de ciclo más adecuada y los desfases relativos para todos los semáforos críticos dentro del sistema (los localizados en los puntos finales). Todos los demás semáforos pueden ser coordinados fácilmente usando diagramas de espacio - tiempo.

Red de Lazo Básica

Los tiempos y coordinación apropiada de los semáforos en una red cerrada puede proveer progresión en un sentido en cada una de las calles que forman el lazo. La relación de los semáforos para estos sistemas esta dada por la siguiente expresión:

$$\sum Desfases + \sum Verdes = NC$$

donde

$$Desfases(0seg) = \frac{Dist.semáf.crit.(mts.)}{Vel.tramo(mts / seg)}$$

donde,

Verde (Verd.) = tiempo de la señal verde, expresado como un porcentaje del ciclo total, dados a los accesos de una intersección hasta que la señal verde se le da al siguiente tramo incluido en la progresión del sistema.

N = una constante que es igual al número de ciclos necesarios para completar un viaje alrededor del lazo cerrado a una velocidad en particular y con los semáforos con un ciclo dado (el mismo para todos).

C (seg.) = longitud del ciclo.

La ecuación siempre proveerá progresión en una dirección. Si todas las intersecciones tienen un repartimiento de 50%-50% se puede establecer progresión en ambos sentidos.

En el nodo final de un tramo, los tiempos de los semáforos permitirán que los vehículos continúen por la intersección. Los vehículos que estén esperando para entrar al sistema en ese nodo e ir en la dirección de la progresión en ese tramo tendrán una indicación roja durante ese intervalo. A la hora indicada, los vehículos que esperan tendrán la señal verde.

El plan de tiempos calculado con este algoritmo estará en efecto en la red proveyendo un sistema cerrado completamente coordinado. La aplicación para un sistema interconectado es evidente.

Metodología Básica

El método básico para utilizar esta ecuación es el siguiente:

- (1) Una vez que los desfases para los varios tramos haya sido determinado, se consigue su sumatoria.
- (2) Se calcula el tiempo verde total, expresado como un porcentaje de la longitud de ciclo C, que es desconocida.
- (3) Los valores de la suma de los desfases y del porcentaje del ciclo que se dedica a verde se insertan en la ecuación, derivándose un valor para el ciclo C.
- (4) Sustituyendo varios valores de N en la ecuación, se obtienen varias posibilidades de ciclos. Un ciclo apropiado se puede escoger de estas posibilidades.

Si se requiere una longitud de ciclo de compromiso entre dos valores posibles, el valor de $\sum \text{Desfases} + \sum \text{Verdes}$, no será un múltiplo exacto de C y se hace necesaria una corrección de los desfases. Hay dos métodos disponibles para lograr estas correcciones y ambos dan el mismo resultado. Usando el primer método, el ingeniero proporciona la diferencia de tiempo entre $(\sum \text{Desfases} + \sum \text{Verdes})$ y (NC) de acuerdo a la distancia de los tramos. El segundo método para ajustar los desfases se basa en tiempo. Según este método, para cada tramo, la corrección de desfases es igual a los desfases originales multiplicado por

$$\frac{|(NC) - (\sum \text{Desf.} + \sum \text{Verd.})|}{\sum \text{Desf. Originales}}$$

La corrección de los desfases debe ser sustraída de los desfases originales.

Nótese que la ecuación básica no provee progresión para un movimiento continuo alrededor del lazo. En vez de eso, provee progresión coordinada para los segmentos que comprenden uno de los lados de la red cerrada. Esta es la condición preferida en situaciones donde se cruzan arterias principales y se desea mantener el flujo de tránsito en ambas arterias.

Sin embargo, cuando lo que se desea es un movimiento continuo alrededor del lazo cerrado, se puede modificar la ecuación eliminando el término " $\sum \text{Verd.}$ ". Por lo tanto, la suma de los desfases en la ecuación resultante tendría que ser un múltiplo de la longitud del ciclo. Si esto no da una longitud de ciclo razonable, los desfases pueden ser ajustados, a pesar d ello, el ingeniero debe tomar en cuenta que al cambiar los desfases también se cambia la velocidad de progresión.

Intersecciones con más de Cuatro Accesos

La mayoría de las ciudades en Latinoamérica no tiene un patrón de calles completamente ordenado y rectangular. Muchas de las intersecciones tienen cinco o más accesos. Por lo tanto, el problema es como determinar una longitud de ciclo que provea una progresión para todas las intersecciones en un sistema que incluya este tipo de intersecciones. Como ejemplo, considérese una progresión en el sentido de las agujas del reloj para los lazos a-b-d-e-a y a-c-e-a en la Figura 10.35 a una velocidad de 25 pies por segundo.

Calculando los desfases:

$\text{Desf.}_{ab} = 1125/25 = 45 \text{ seg.}; \text{Desf.}_{ac} = 78 \text{ seg.}; \text{Desf.}_{ce} = 40 \text{ seg.}; \text{Desf.}_{de} = 15 \text{ seg.}; \text{Desf.}_{bd} = 20 \text{ seg.}; \text{Desf.}_{ea} = 40 \text{ seg.}$

Por lo tanto, para una longitud de ciclo de 60 segundos, los desfases ajustados son: $Desf_{.ab} = 45$ seg.; $Desf_{.ac} = 78 + 1 = 79$ seg.; $Desf_{.ce} = 40 + 1 = 41$ seg.; $Desf_{.de} = 15$ seg.; $Desf_{.bd} = 20$ seg.; $Desf_{.ea} = 40$ seg.; $Desf_{.bc} = Desf_{.ac} - Desf_{.ab} = 79 - 45 = 34$ seg.; $Desf_{.cd} = Desf_{.ce} - Desf_{.de} = 41 - 15 = 26$ seg.

(b) Usando $Verd_c = 0.67 C$

Lazo a-b-d-e-a

$$\Sigma Desf. + \Sigma Verd. = NC$$

$$120 + 2.0 C = NC$$

$$C = 120/(N-2.0)$$

Si $N = 2$;

$$N = 3; \quad C = 120 \text{ segundos}$$

$$N = 4; \quad C = 60 \text{ segundos}$$

$$N = 5; \quad C = 40 \text{ segundos}$$

Lazo a-c-e-a

$$\Sigma Desf. + \Sigma Verd. = NC$$

$$158 + 1.67 C = NC$$

$$C = 158/(N-1.67)$$

$$C = 479 \text{ segundos}$$

$$C = 119 \text{ segundos}$$

$$C = 68 \text{ segundos}$$

$$C = 47 \text{ segundos}$$

Escoger $C = 120$ segundos.

No se necesita corrección $\Sigma Desf. + \Sigma Verd. = NC$

$$158 + 1.67(120) \equiv (3) (120)$$

$$358 \neq 360$$

Por lo tanto, se deben incrementar los desfases en 2 segundos.

Como se hizo anteriormente, agregar 1 segundo a los desfases $Desf_{ac}$ y $Desf_{ce}$. Por lo tanto, para una longitud de ciclo de 120 segundos, los desfases ajustados son: $Desf_{ab} = 45$ seg.; $Desf_{bd} = 20$ seg.; $Desf_{de} = 15$ seg.; $Desf_{ea} = 40$ seg.; $Desf_{ac} = 79$ seg.; $Desf_{ce} = 41$ seg.; $Desf_{bc} = 34$ seg.; $Desf_{cd} = 26$ seg.

Se hubiera podido escoger una longitud de ciclo de 60 o 40 segundos, pero los ajustes necesarios hubieran sido de proporciones mucho mayores de los logrados. El resultado hubiera sido una desviación más grande de la velocidad deseada. Sin embargo, esto se podría considerar satisfactorio si un ciclo de 120 segundos se considera muy largo.

Los resultados de las partes (a) y (b) se presentan en las figuras 3(a) y 3(b). En estas ilustraciones se muestran los desfases y la indicación de verde de cada acceso, basados en longitudes de ciclo de 60 y 120 segundos respectivamente. Nótese que las diferencias en longitudes de ciclo están basadas en las diferencias de las secuencias de las fases de la intersección de los 6 accesos.

El método presentado anteriormente permite el cálculo de tiempos para semáforos de una red cerrada. Utilizando este método se pueden desarrollar ciclos y desfases para los semáforos de cualquier patrón de sistemas de vialidad.

Figura 10.35. Sistema de Intersecciones

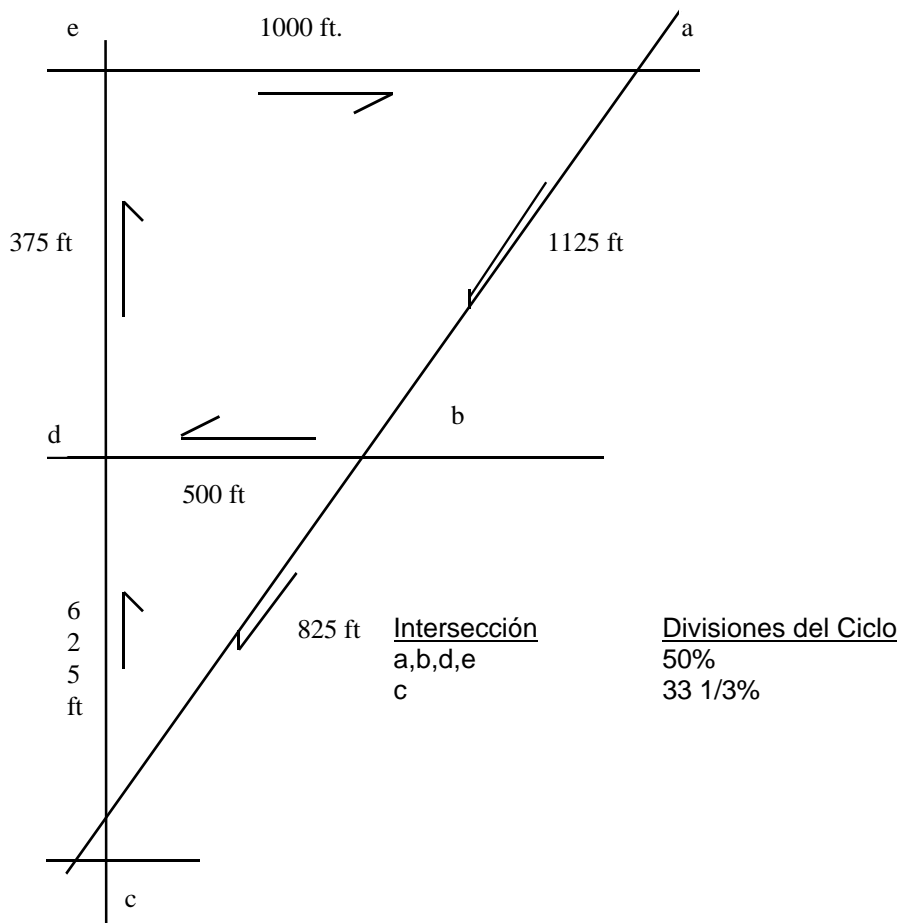
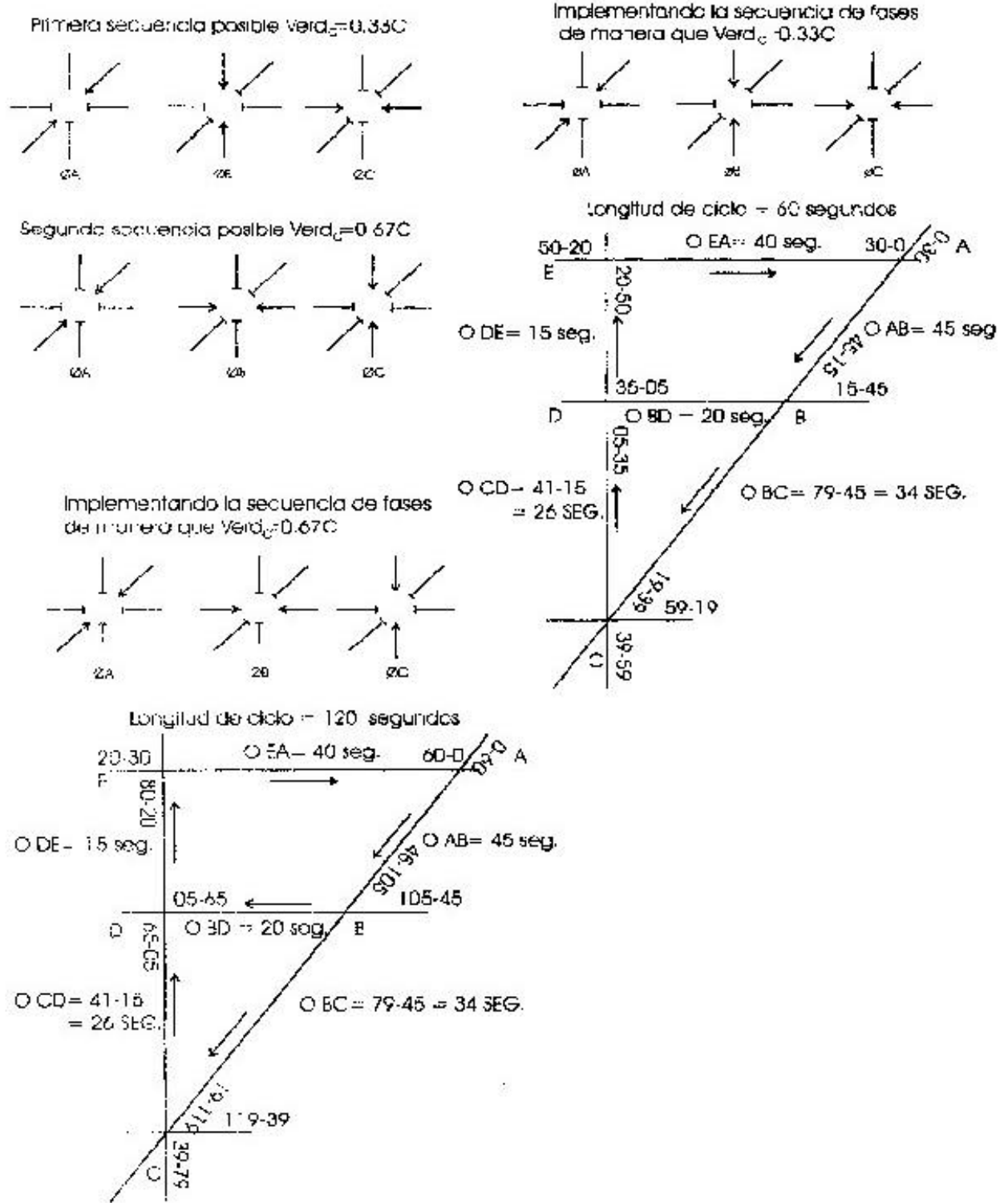


Figura 10.36 y 10.37. Posibilidades de secuencia de fases para la intersección "c" y secuencia de tiempos.



11. DETECTORES

INTRODUCCIÓN

Función de los Detectores de Tránsito

Debido a que los movimientos de tránsito no son constantes con el tiempo, es deseable tener la habilidad de ajustar las operaciones del semáforo de acuerdo con las demandas de flujo de tránsito. Esto se logra tomando en cuenta las fluctuaciones del tránsito con dispositivos de control en el sendero de los vehículos. El detector manda una señal al controlador y este es capaz de ajustar las fases del semáforo a las demandas de tránsito.

Los detectores trabajan bajo dos principios básicos: detección de contacto que es cuando un vehículo hace contacto con el dispositivo de detección y detección por cambio de energía, que es cuando un vehículo pasa sobre el dispositivo y crea un cambio en el campo de energía alrededor del dispositivo.

La detección puede ser de dos tipos: por presión de paso o presencia de vehículos. Un detector de paso detecta la llegada de un vehículo que pasa sobre el detector. Un detector de presencia reconoce la presencia de un vehículo sobre el detector y mantiene la señal al controlador mientras el vehículo permanece sobre el detector.

Tipos de Detectores

Corrientemente se han usado los siguientes detectores:

- A presión
- Magnéticos
- Focélulas
- Radar
- Sónicos
- Infrarrojos
- Lazos de Inducción
- Magnetómetros
- Coaxiales
- Microlazos
- Ambulancias, bomberos (focélula)

Uso de detectores de Lazo

Son los más usados en la industria. El lazo usa un cambio en el campo de energía del lazo para enviar la señal al controlador. Consiste de un lazo rectangular dentro de una ranura en el pavimento. Un vehículo hace que la inductancia del lazo cambie. La unidad detectora detecta el cambio de la frecuencia, fase o amplitud y manda una señal al controlador.

Figura 10.38 Modos Mixtos de Operación

Modos mixtos de operación

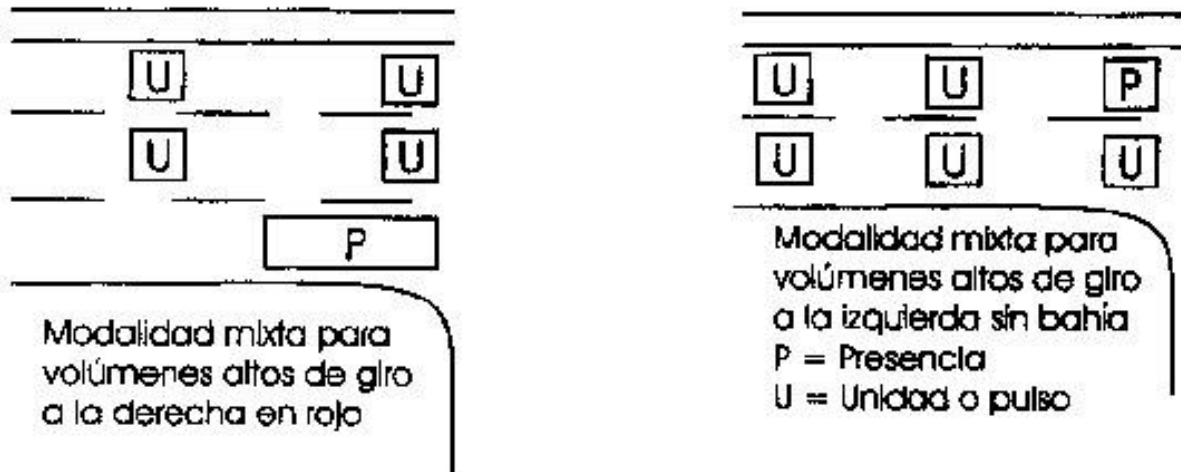
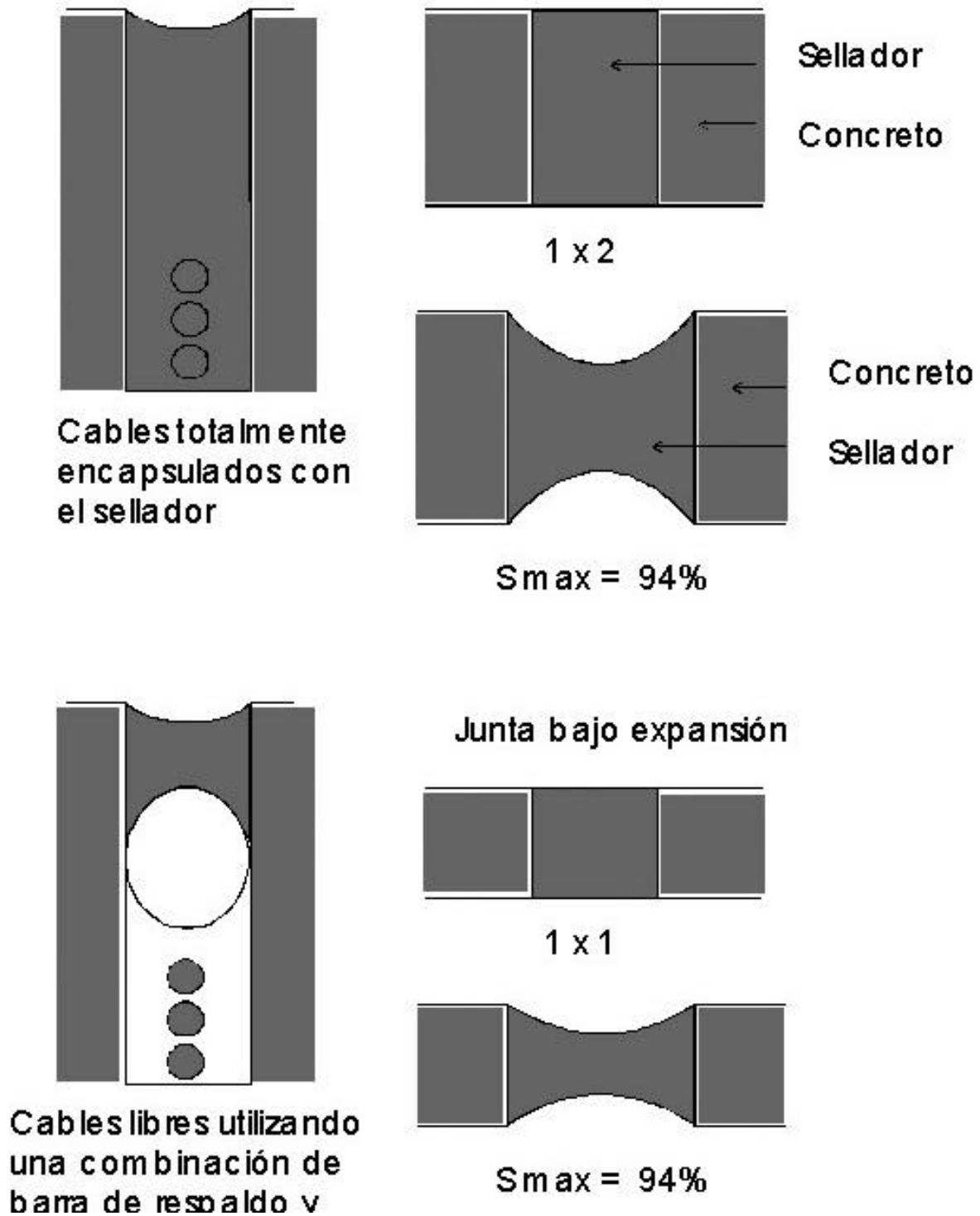


Figura 10.39 Diferentes Tipos de Diseño para el Sellado.



Figuras 10.40 y 10.41 Ubicación de Detectores en Intersecciones.

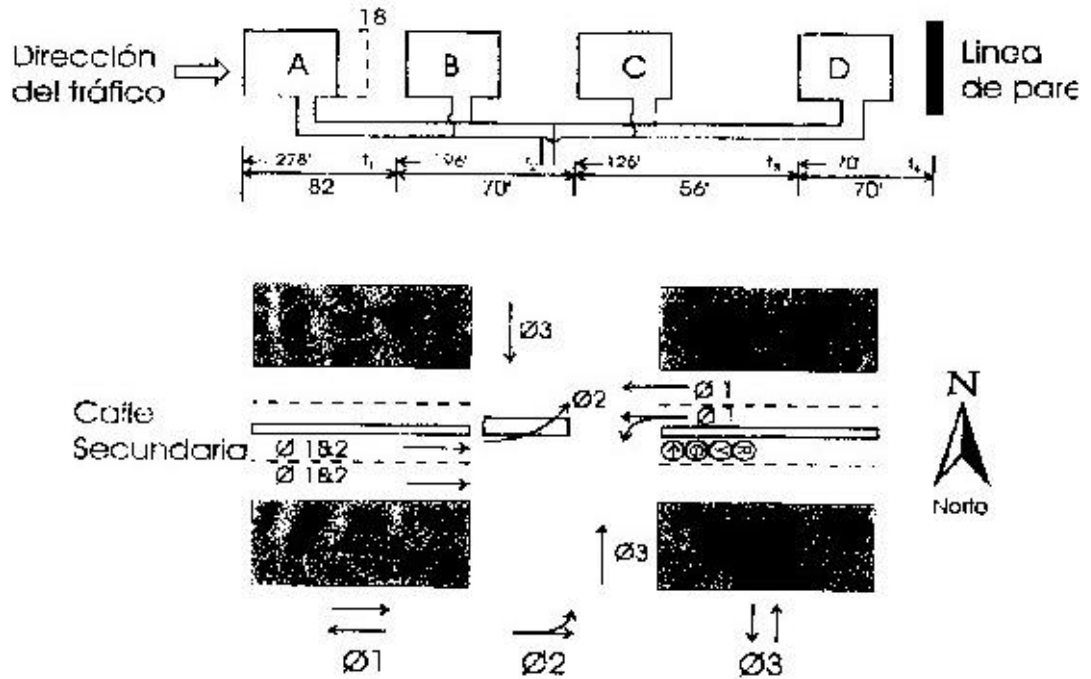
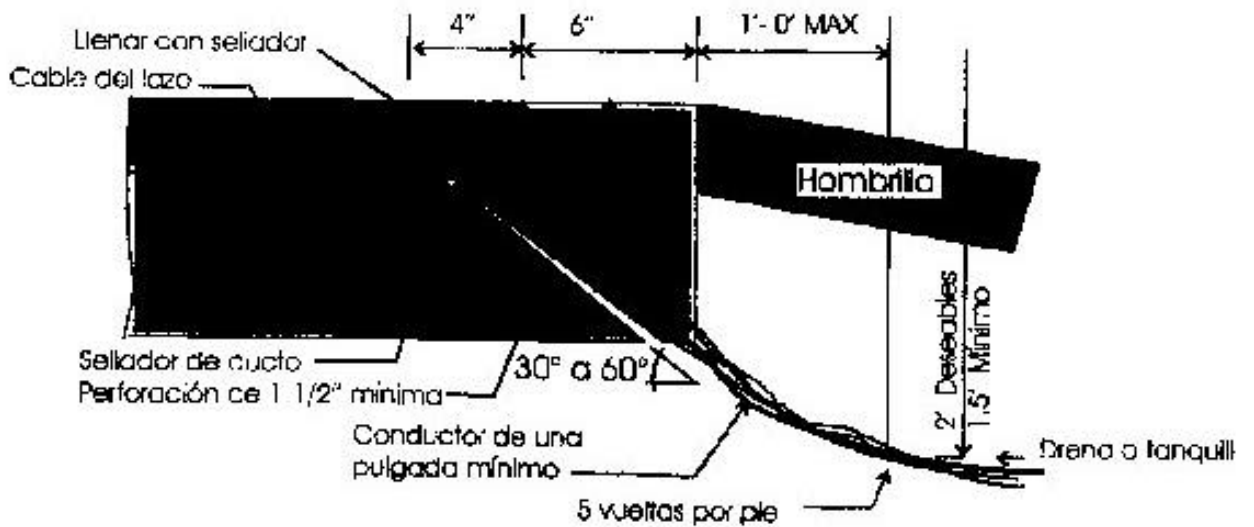
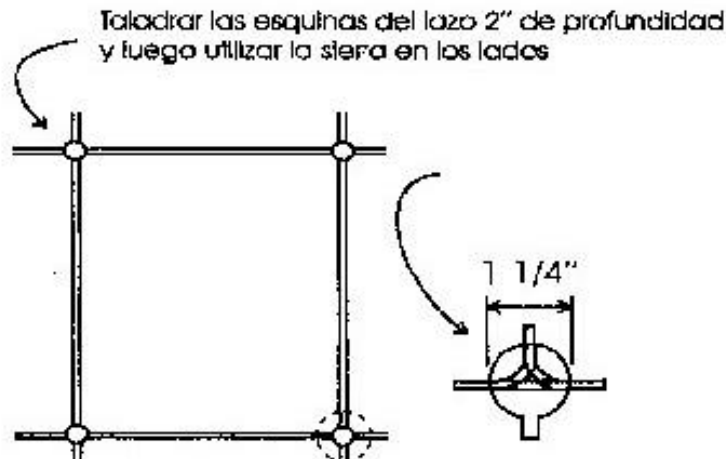
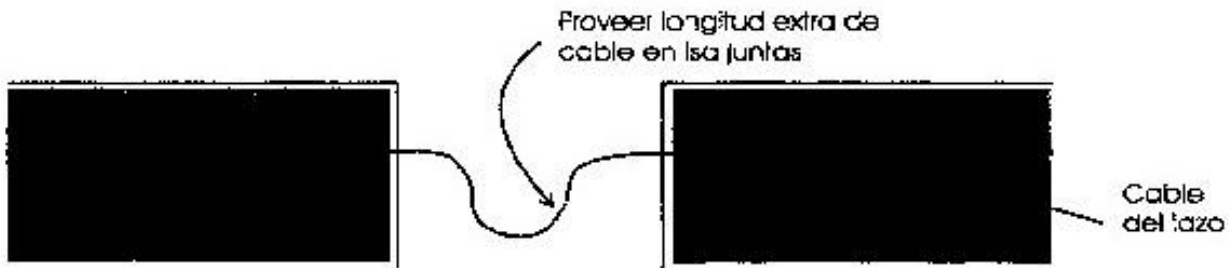
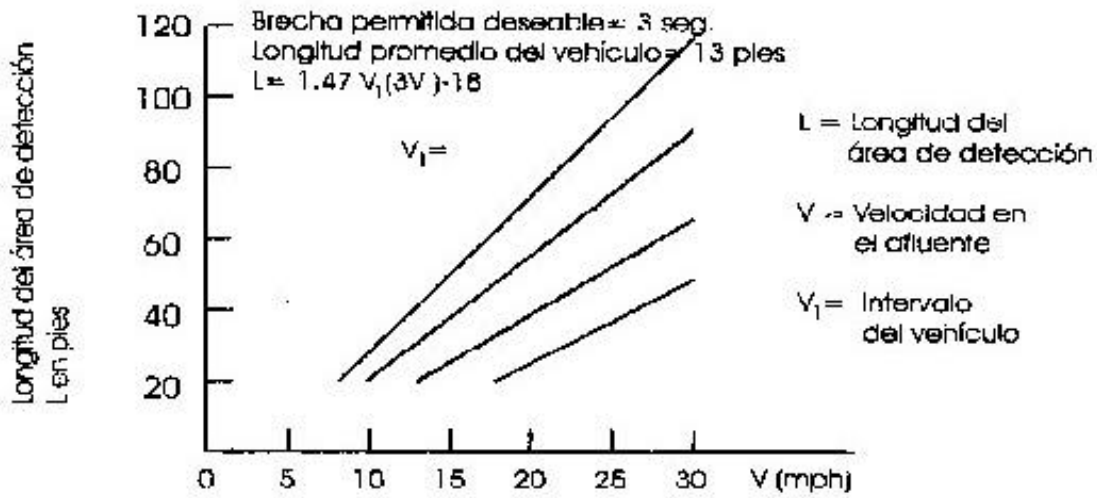


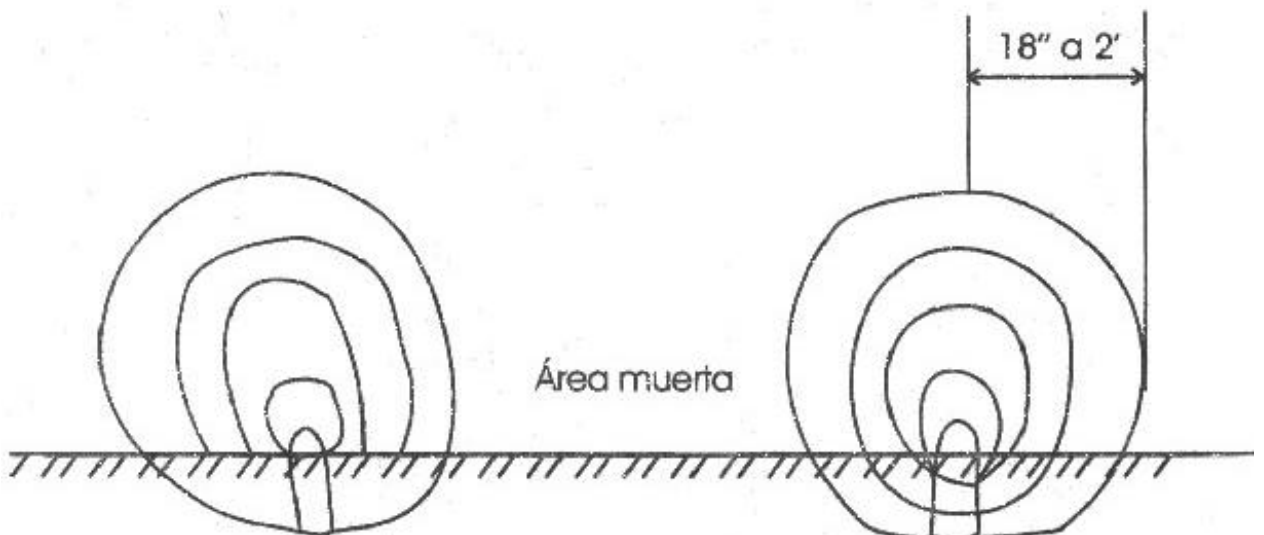
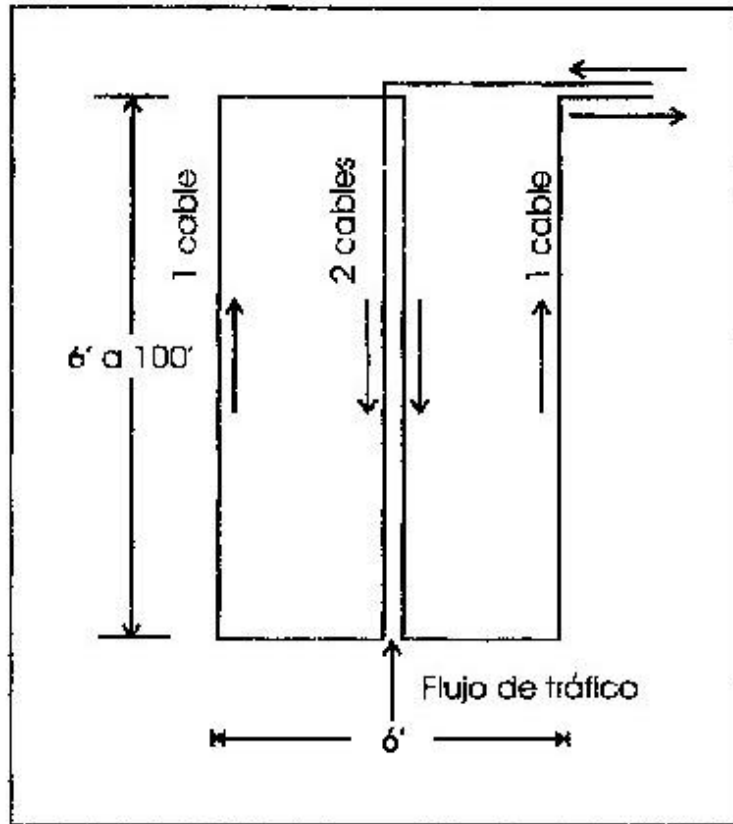
Figura 10.42 Detalle de Construcción, Acometida al Detector (desde unidad detectora)



Figuras 10.43, 10.44 y 10.45. Requerimientos para el diseño de Lazos Largos, Tratamiento de la Junta de Expansión y Lazo con Tratamiento alternativo de las esquinas.



Figuras 10.46 y 10.47 Configuración de Lazos y Área Muerta de los Lazos



Figuras 10.48 y 10.49 Configuración de Detectores y Acometida

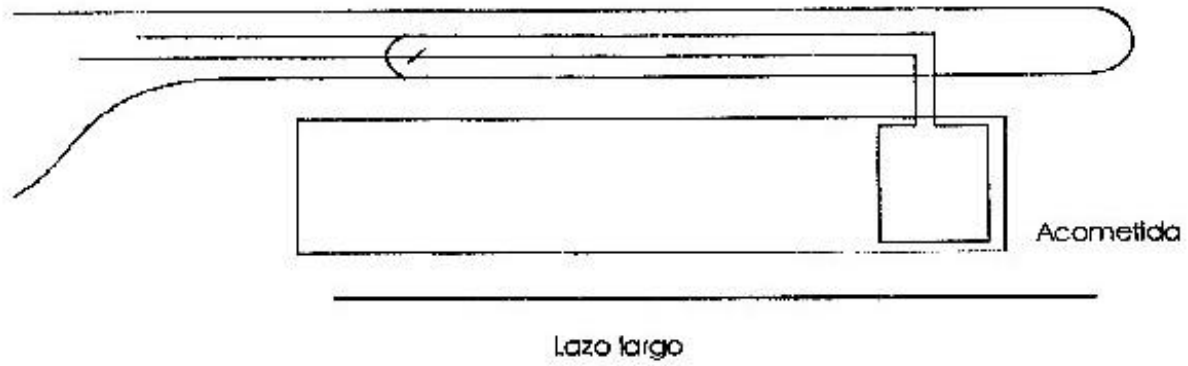
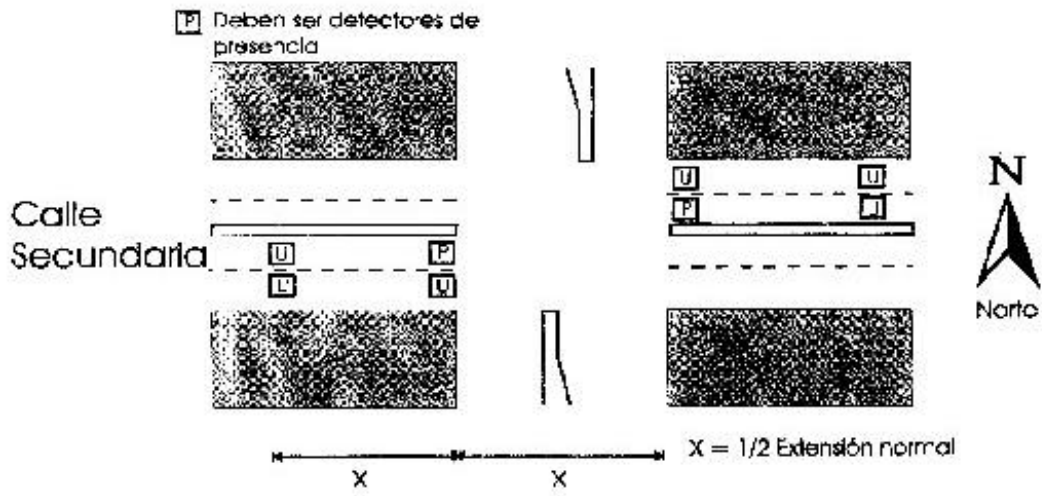


Figura 10.50 Controlador sobre Base de Concreto

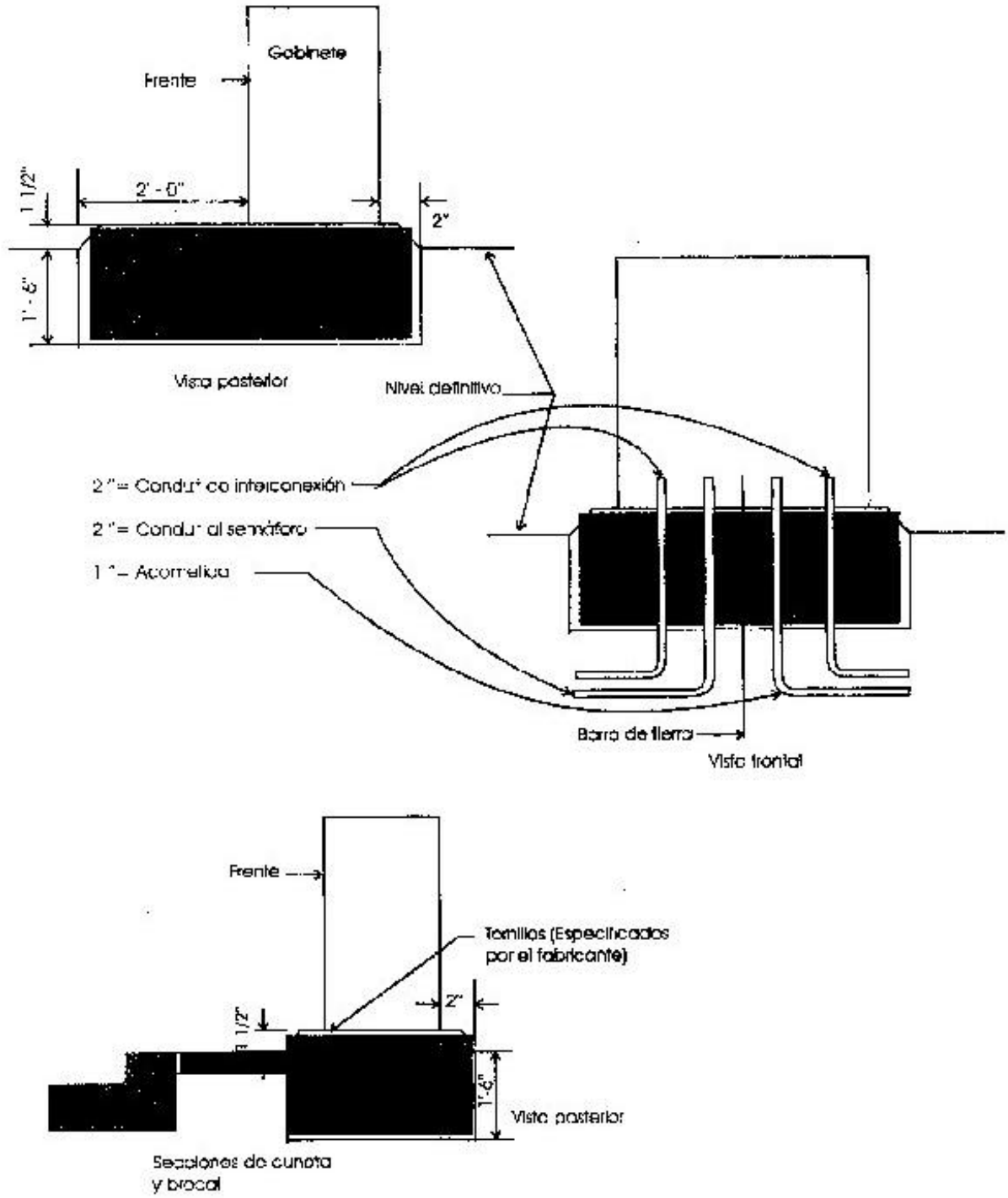
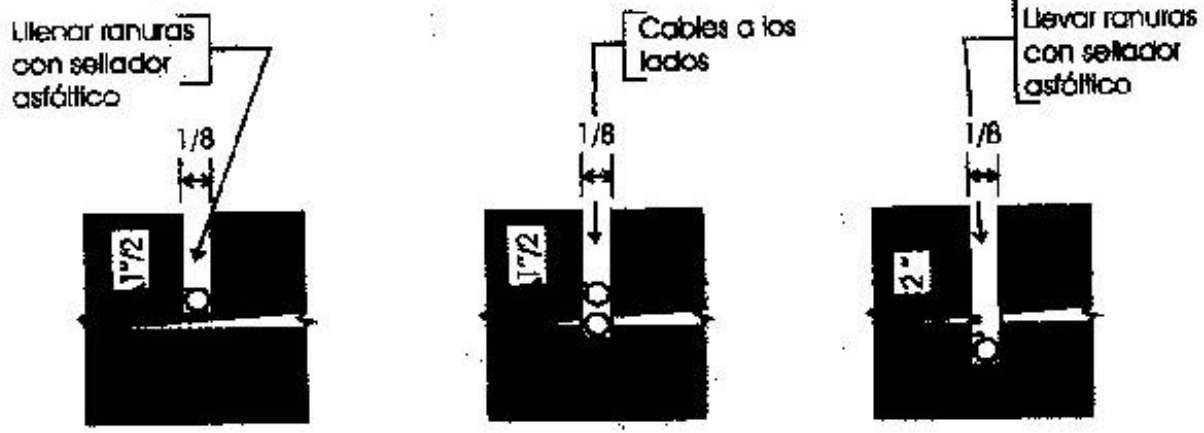
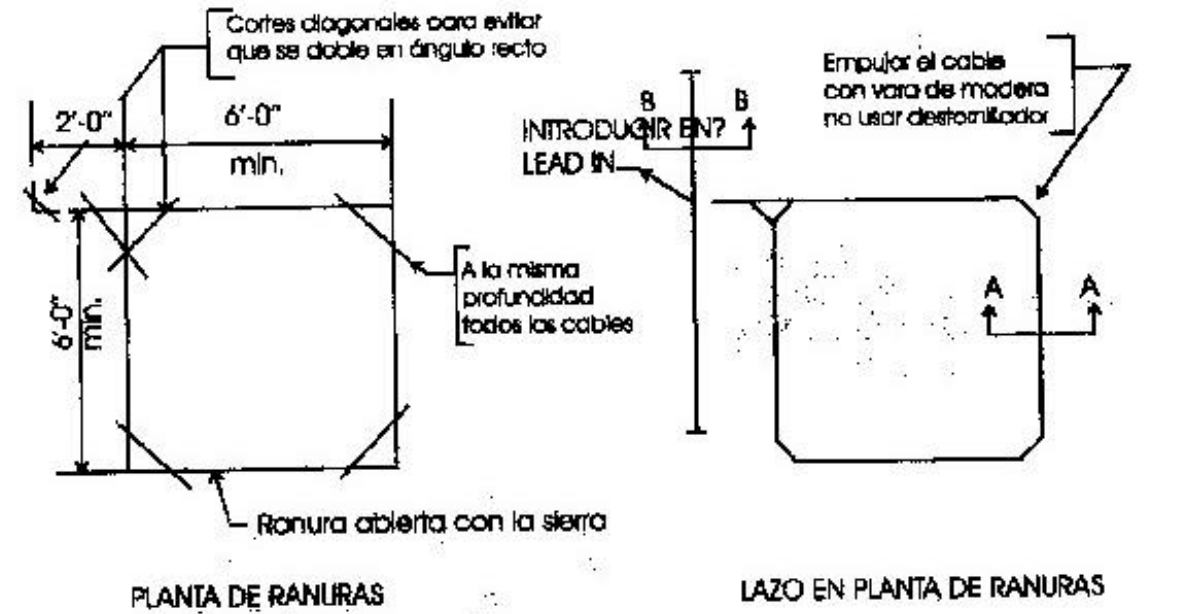


Figura 10.51 Instalación de Lazo Detector

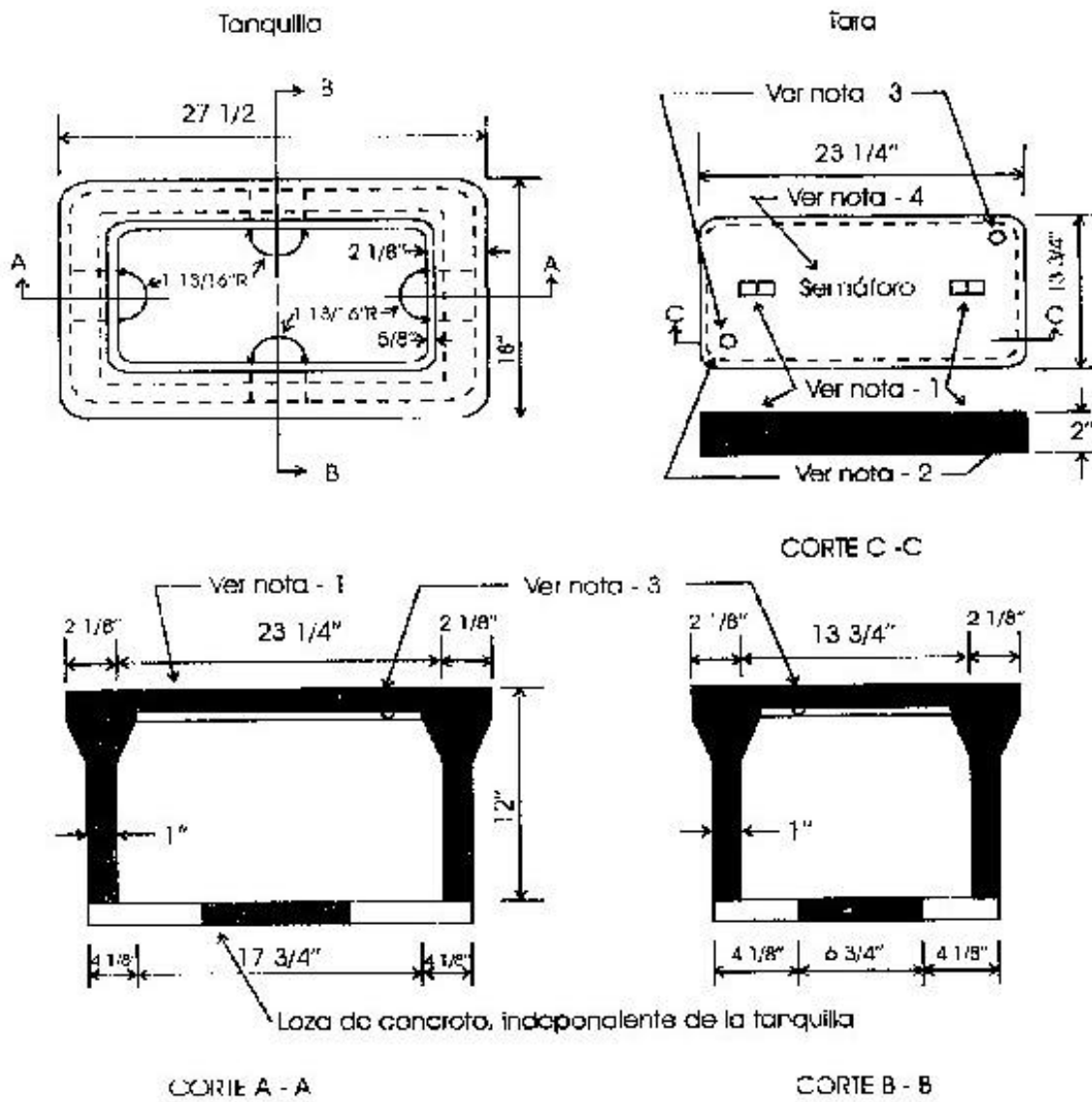


LAZO EN CONCRETO

LAZO EN ASFALTO

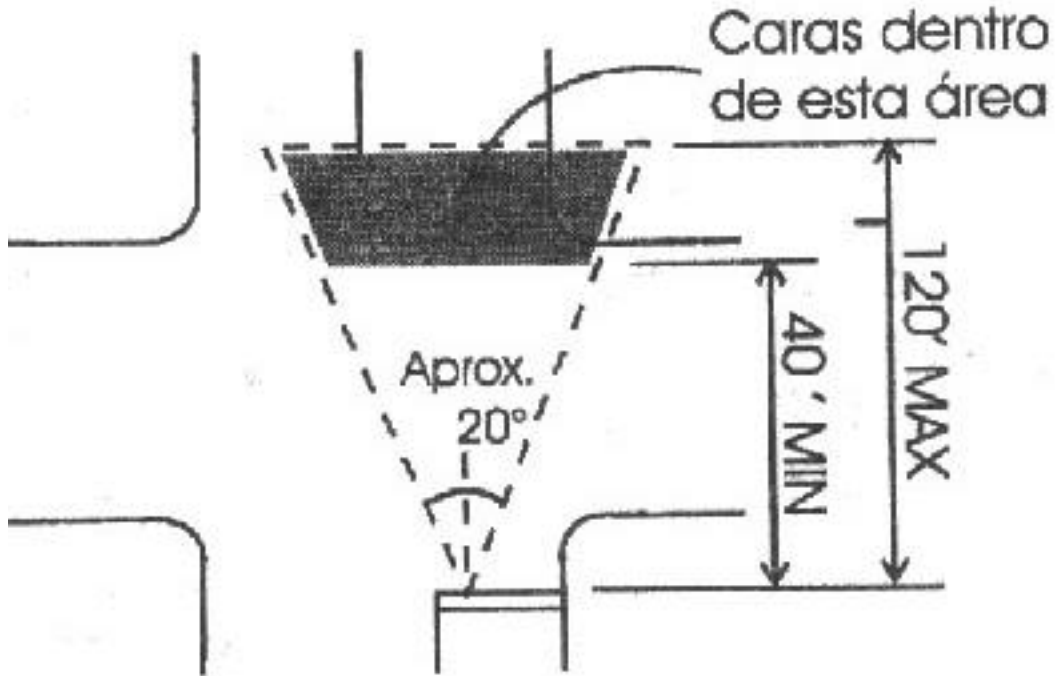
NOTA: Número de lazos de acuerdo a las especificaciones del fabricante.

Figura 10.52 Detalle de Tanquilla



1. Dos agujeros galvanizados para levantarla
2. Refuerzo metálico
3. Tornillos y tuercas en las esquinas diagonales
4. Cubrir con indicación de "SEMÁFORO"

Figura 10.53 Ubicación de las Caras de Semáforos



CAPÍTULO XI. METODOLOGÍA DE ESTUDIOS DE IMPACTO VIAL

No es la intención de este capítulo el exponer todos los elementos que se requieren para preparar y revisar un estudio de impacto vial. Sin embargo, se presentan ejemplos de metodologías para estudios de impactos viales que son comúnmente usadas indiferentemente de las condiciones particulares de cada caso. No es necesario que se adopte la metodología aquí presentada tal cual, sino que sirva de guía para la elaboración de impactos viales.

1. REQUISITOS PARA LOS ESTUDIOS

La necesidad de efectuar un estudio de impacto vial se basa en diversos criterios. Varias municipales requieren estudios de impacto vial cuando se cumplen los siguientes tipos de factores:

- Cuando el desarrollo en cuestión genera un número de viajes determinado durante la Hora de máxima demanda o durante el día.
- Cuando el desarrollo en cuestión tiene una área o un número de viviendas determinadas.
- Cuando el desarrollo es construido en una zona sensible (con problemas de congestión).
- Cuando se cambia la zonificación del área.
- A juicio del organismo que los requiere.

No hay una regla predeterminada para fijar las cantidades (de viajes generados, área de desarrollo, número de viviendas) que hacen necesario un estudio de impacto vial. Estas cantidades deben ser determinadas por el organismo encargado, dependiendo de las necesidades, problemas y políticas locales. Según algunas municipales y como una práctica recomendada en Estados Unidos, se sugiere que se haga un estudio de impacto vial cuando el desarrollo propuesto genere más de 100 viajes durante la Hora de máxima demanda del desarrollo o la Hora de máxima demanda de la red vial alrededor del desarrollo. Según el Instituto de Ingenieros de Transporte (ITE), lo expuesto anteriormente es válido por las siguientes razones:

- 100 vehículos por hora son suficientes para cambiar el nivel de servicio de un flujo en una intersección.
- Es posible que se necesiten carriles exclusivos de giro a la izquierda o derecha para satisfacer las necesidades del tránsito adicional generado de manera que no afecte el tránsito no generado por el desarrollo.

Es importante resaltar que, como se mencionó anteriormente, un estudio de impacto vial puede ser requerido por un organismo de acuerdo a las políticas de este o basado en las necesidades particulares del área donde se propone el desarrollo.

2. EXTENSIÓN DEL ESTUDIO

El proceso de determinar la extensión del estudio de impacto vial es parecido a la decisión de hacerlo. Sin embargo, la extensión del estudio debe ser una decisión conjunta entre el

organismo que lo requiere y las personas que lo preparan. Se deben determinar las necesidades particulares del caso. Los factores a continuación deben ser tomados en cuenta para determinar la extensión de los objetivos del estudio de impacto vial, sin embargo, no todos los factores son enumerados aquí:

- Detalle de los análisis para determinar la generación de tránsito futuro. Decidir si usar tasas de generación existentes o hacer un estudio especial para determinarlas.
- Consideración de los modos de viaje.
- Consideración de los viajes generados por el desarrollo por pasantes. Estos son viajes que no tienen como motivo fundamental el ir al desarrollo (por ejemplo, el ir de compras al supermercado que esta en la trayectoria del trabajo a la casa, antes de llegar al hogar). Nótese que en este caso, la red vial principal no se ve afectada, pero los accesos al desarrollo si son afectados.
- Determinación del área de influencia del desarrollo
- Necesidad de conteos de tránsito. Horas y días en los cuales el tránsito debe ser contado.
- Consideración de desarrollos adyacentes al proyecto en cuestión. Hipótesis de crecimiento del tránsito en el área y la asignación de los viajes.
- Como tomar en cuenta mejoras y obras a la vialidad que estén planificadas o estén por construirse.
- En caso de que el desarrollo sea en fases, decidir si se deben tomar en cuenta por etapas o en total. Determinar los años futuros a ser considerados.
- Método y grado de detalle de la distribución y asignación de los viajes.
- Determinar las intersecciones y segmentos de vía a ser considerados.
- Determinar la técnica de análisis de capacidad vial a ser utilizado.
- Determinar cambios necesarios en el control de tránsito.
- Determinar la necesidad de análisis adicionales, tales como accidentes, visibilidad, impactos ambientales, etc.
- Detalle de las recomendaciones.
- Determinar el financiamiento de las recomendaciones.

3. ÁREA DE ESTUDIO

Depende de la ubicación y tamaño del desarrollo a construirse. Por ejemplo, un desarrollo grande en una área de difícil acceso requiere un análisis mas extenso. Como mínimo se deben tomar en cuenta todos los accesos al desarrollo y las intersecciones mas cercanas de importancia. Áreas muy extensas aumentan el costo del estudio y muchas veces es innecesario. En áreas muy restringidas no se evalúan los impactos adecuadamente. La decisión del tamaño del área de estudio de impacto vial debe ser tomada en mutuo acuerdo del organismo que los requiere y las personas que lo realizan. Es necesario que los que preparan el estudio conversen con los técnicos de la agencia para llegar a acuerdos y obtener información existente que se refiera a:

- Conteos disponibles.
- Mejoras a la vialidad planificadas y programa de construcción.
- Desarrollos adicionales aprobados y tránsito base proyectado (estimaciones de tránsito futuro sin añadir los viajes generados por el desarrollo).
- Zonas congestionadas dentro del área de influencia.

- Datos de accidentes en zonas de altos índices de accidentes.
- Sistemas de semáforos en el área de estudio.
- Problemas no usuales que causen un comportamiento particular atípico en el tránsito.

4. SELECCIÓN DE LOS HORIZONTES DE ANÁLISIS

Deben analizarse las condiciones de operación existentes de la red vial alrededor del desarrollo antes de este ser construido. Los datos de conteos no deben ser mayores de un año.

Por lo general, la selección de los horizontes de análisis esta basada en factores tales como la fecha en la cual el desarrollo esté completamente construido y ocupado, las diferentes fases de construcción y ocupación del desarrollo en cuestión, horizontes de planeación de la agencia que requiere los estudios, cambios futuros en el sistema de transporte u horizontes financieros de la agencia. El siguiente cuadro indica sugerencias del Instituto de Ingenieros de Transporte (ITE) para determinar los horizontes de análisis según las características de los desarrollos.

Cuadro 11.1. Horizontes de Análisis Recomendados

Características del Desarrollo	Horizontes Recomendados
Desarrollos Pequeños (< 500 viajes generados en la Hora de máxima demanda)	<ul style="list-style-type: none"> • Año de inauguración, asumiendo construcción y ocupación completas
Desarrollos moderados construidos en una sola fase (500-1000 viajes generados en la Hora de máxima demanda)	<ul style="list-style-type: none"> • Año de inauguración, asumiendo construcción y ocupación completa • Cinco años después de la inauguración del desarrollo.
Desarrollos Grandes construidos en una sola fase (> 1000 viajes en la Hora de máxima demanda)	<ul style="list-style-type: none"> • Año de inauguración, asumiendo construcción y ocupación completa • Cinco años después de la construcción y ocupación • Un año horizonte determinado por la agencia en sus planes si el tamaño del desarrollo es considerablemente superior al tamaño estimado en los usos del suelo de la zonificación en particular.
Desarrollos moderados y grandes, construidos en varias fases	<ul style="list-style-type: none"> • Años de inauguración de las diversas fases, asumiendo construcción y ocupación completas de cada fase • Año de inauguración de la fase final, asumiendo construcción y ocupación completa. • Un año horizonte determinado por la agencia en sus planes si el tamaño del desarrollo es considerablemente superior al tamaño estimado en los usos del suelo de la zonificación en particular. • Cinco años después de la fecha de inauguración.

Como fue discutido con anterioridad, el objetivo de un estudio de impacto vial es mostrar que efectos pueda tener un proyecto en particular sobre el sistema de transporte al rededor. Por lo general, el periodo de tiempo crítico desde el punto de vista de tránsito es durante las horas pico de la red vial circundante y del proyecto en particular.

Las horas pico de la red vial circundante puede ser determinada a partir de conteos, por lo general una hora de la mañana y una hora de la tarde. Las horas pico del desarrollo en cuestión dependen mucho de las características de los usos de suelo contenidos en el desarrollo. La hora en que el desarrollo genere el mayor número de viajes puede diferir de la Hora de máxima demanda de la red vial circundante. También se deben tomar en cuenta comportamientos particulares de algunos usos de suelo durante los fines de semana u ocasiones especiales.

5. DATOS BASE PARA EL ESTUDIO DE IMPACTO VIAL

Toda la información relacionada con transporte y desarrollos del área debe ser recopilada y revisada. El cuadro que se presenta a continuación presenta las sugerencias del Instituto de Ingenieros de Transporte de los datos que son necesarios recopilar para un estudio de impacto vial. Es importante tener claras las características de operación de la red de transporte antes de la construcción del desarrollo. Deben ser tomados en cuentas todos los cambios en usos del suelo y sistema de transporte que hayan ocurrido o que estén proyectados dentro del área de estudio y durante el periodo determinado. Además de los datos que se presentan en el cuadro 11.2, una observación en situ de las condiciones de operación del tránsito es indispensable. La figura 11.1, ilustra una forma de resumir la información relativa a los volúmenes existentes durante la Hora de Máxima Demanda en una red vial bajo estudio.

Cuadro 11.2. Datos Base para Revisión

Categoría	Datos
Volúmenes de Tránsito	<ul style="list-style-type: none"> • Conteos diarios y horarios actuales e históricos (si son necesarios para el análisis) • Conteos de giro recientes en las intersecciones • Variaciones por temporadas • Proyecciones de volúmenes de tránsito de otros estudios o planes regionales
Usos del Suelo	<ul style="list-style-type: none"> • Usos del suelo y densidades en el área circundante al desarrollo • Características (usos, densidades, fecha de inauguración, etc.) de desarrollos adicionales que hayan sido aprobados • Desarrollos anticipados para terrenos baldíos en el área de estudio • Plan maestro de usos del suelo • Zonificación
Demografía	<ul style="list-style-type: none"> • Datos recientes de población y empleo dentro del área de estudio por áreas del censo o áreas de tránsito (usado en la distribución del tránsito generado por el desarrollo).
Sistema de transporte	<ul style="list-style-type: none"> • Características de la red vial circundante (geometría, sentidos de circulación, control de tránsito) y jerarquía vial. • Ubicación de semáforos, coordinación y fases • Características del transporte público • Características de estacionamiento • Financiamiento de mejoras a la vialidad
Datos Adicionales de Transporte	<ul style="list-style-type: none"> • Datos de origen y destino y distribución de viajes • Datos de accidentes

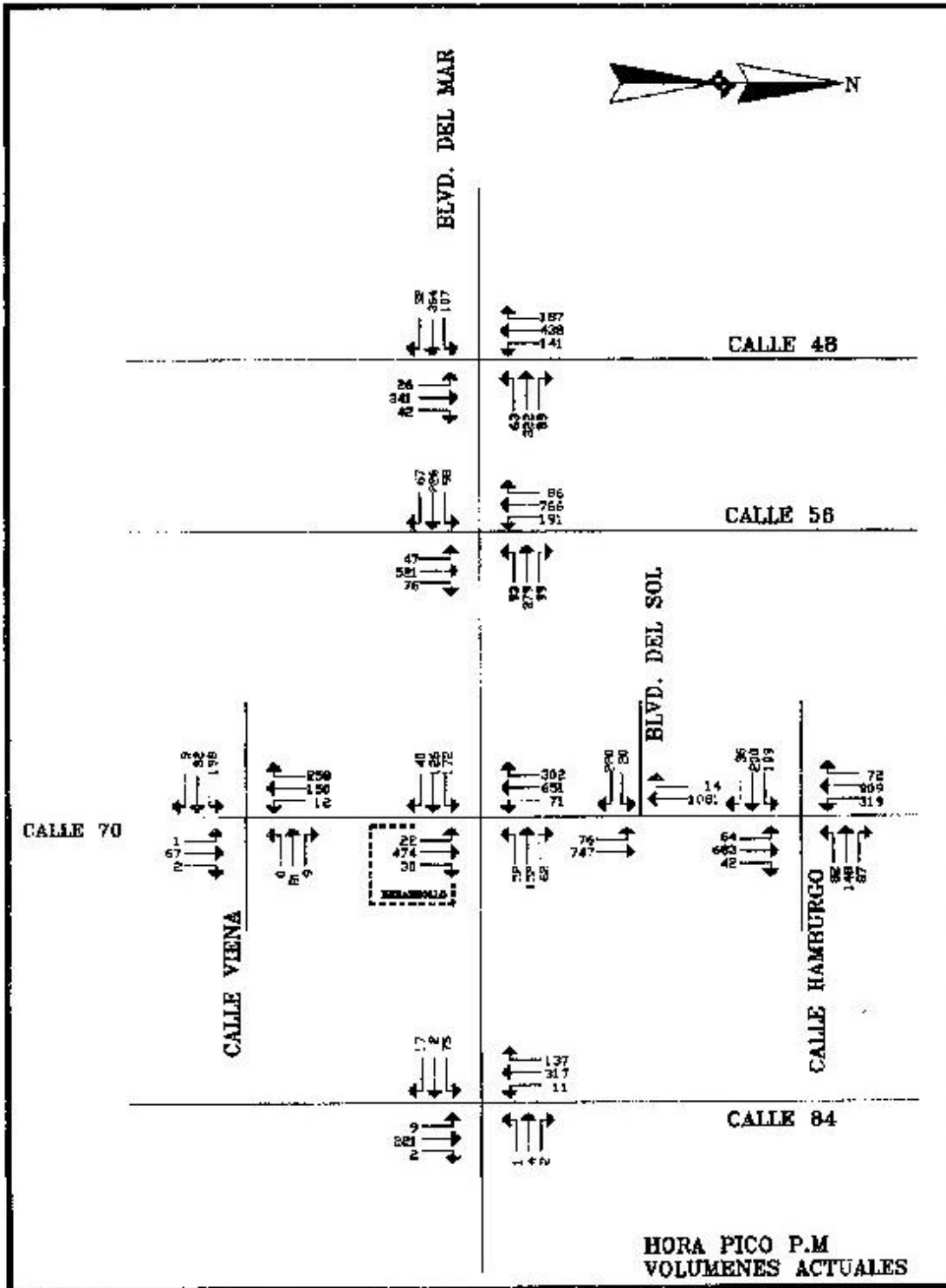


Figura 11.1. Volúmenes de Tránsito Existentes durante la Hora de Máxima Demanda en una Red Vial Bajo Estudio.

6. PROYECCIONES DE TRÁNSITO NO RELACIONADAS CON EL DESARROLLO

Este tipo de proyecciones de tránsito son las que suministran la condición base para el análisis. Consisten de dos componentes fundamentales:

- Tránsito generado por otros desarrollos dentro del área de estudio que tengan orígenes y destino dentro del área de estudio.
- Tránsito de paso por el área de estudio, cuyos orígenes y destinos no están dentro del área en cuestión.

Existen diversas metodologías para estimar las proyecciones de tránsito. Aquí se mencionan tres, incluyendo algunas de sus ventajas:

1. Método basado en la consideración de otros desarrollos aprobados en el área de estudio. Por lo general es apropiado para áreas de crecimiento moderado y cuando el proyecto del desarrollo bajo estudio tiene horizontes futuros de diez años o menos. Es un buen método cuando hay información confiable acerca de desarrollos aprobados.
2. Método basado en el plan integral de transporte: estos planes, por lo general, tienen proyecciones de tránsito bajo diferentes alternativas. Usar los datos disponibles a través de este tipo de estudios es apropiado para desarrollos regionales grandes que se construirán a lo largo de un periodo de tiempo considerable, en áreas de crecimiento rápido. La confiabilidad de estimaciones obtenidas con este método, depende de la confiabilidad del estudio.
3. Método basado en tasas de crecimiento basadas en datos históricos del crecimiento del tránsito. Se deben obtener por lo mínimo 5 años de datos mostrando un crecimiento estable. Es usado para proyectos no muy grandes que serán construidos en uno o dos años. Es una metodología simple pero no es apropiada para desarrollos con horizontes a largo plazo y existe la posibilidad de sobrestimar o subestimar la demanda futura de tránsito no relacionada con el desarrollo en cuestión.

A continuación se hacen comentarios de cada una de las metodologías.

Método basado en Impactos de Desarrollos Adicionales

Es un método adecuado cuando se necesita un alto nivel de detalle en una área que se esté desarrollando rápidamente. Es un método que por lo general requiere de bastante trabajo. Se pueden hacer simplificaciones en mutuo acuerdo con la agencia que requiere el estudio. Se basa en el procedimiento siguiente:

- Estimar los impactos de mejoras al sistema de transporte que se lleven a cabo durante el periodo de proyección.
- Identificar el desarrollo del área de estudio dentro del periodo de proyección, basado solo en desarrollos aprobados. No se deben hacer hipótesis de uso de suelo de terrenos baldíos sin desarrollo inminente.
- Estimar la generación de viajes de los desarrollos inminentes.
- Estimar la distribución direccional.
- Asignar el tránsito generado a la red vial.

- Estimar el crecimiento del tránsito de paso. Por lo general utilizando datos históricos.
- Sumar el tránsito generado por los desarrollos inminentes y asignados a la red vial y las proyecciones de tránsito de paso.
- Checar para ver la lógica de los resultados y ajustar si es necesario.

Método Basado en el Plan Integral de Transporte

Este tipo de estudios por lo general tienen (o deberían tener) proyecciones de tránsito a un horizonte de 20 años en el futuro. Estas proyecciones pueden ser usadas para estudios de impacto vial de desarrollos grandes que tengan un impacto a nivel regional y donde las proyecciones tengan credibilidad. También pueden ser usadas en proyectos grandes que impacten corredores bastante congestionados.

Deben tomarse precauciones en estos estimados de proyecciones de tránsito, ya que son destinados para vialidades principales con el objetivo de reservar derechos de vía de vialidades futuras.

Ninguno de los métodos de proyecciones de tránsito usados en estudios integrales producen el nivel de detalle necesario para un análisis de intersecciones confiable. Si las proyecciones de la red vial de estudios integrales va a ser usada, se debe tener confianza que las proyecciones son representativas o que pueden ser ajustadas manualmente con facilidad. Se debe tener en cuenta que, aún cuando una red muy detallada sea usada en el modelo, y algún tipo de técnica de senderos múltiples para la asignación de viajes sea usada, los volúmenes de giro que se obtienen de modelos de transporte no pueden ser usados para análisis detallados.

Método Basado en Tasas de Crecimiento

Método popular y muy fácil de usar pero que puede ser fuente de errores. Se basa en la hipótesis que el crecimiento de los volúmenes de tránsito seguirá la misma tendencia que ha tenido en los últimos años. Estas tasas de crecimiento no deben ser usados para horizontes de mas de 10 años. Para la estimación de estas tasas, se debe usar el crecimiento histórico de los volúmenes promedios diarios anuales. Este método no debería ser usado en áreas donde haya desarrollos adicionales extensos o donde se proyecten cambios al sistema de transporte que sean significativos y que puedan cambiar los patrones de viaje del área.

Es importante notar que los impactos de cambios al sistema de transporte del área bajo estudio, deben ser cuantificados en la determinación de la situación base del estudio de impacto vial.

El análisis operacional de la situación base dará la noción de como operará el tránsito en el futuro sin la adición del tránsito generado por el desarrollo bajo estudio. Este sería el punto de referencia y de comparación para determinar los impactos viales del desarrollo y las medidas mitigantes necesarias para proveer acceso y capacidad adecuados.

7. GENERACIÓN DE VIAJES DEL DESARROLLO PROPUESTO

Este es uno de los factores más críticos en la determinación de impactos viales. No existe en México una base de datos que permita obtener tasas de generación de viajes confiables, por lo que resulta necesario crear dicha base de datos. Para estimar tasas de generación apropiadas se podrían seguir los siguientes pasos:

- Ver si existe disponibilidad de tasas de generación de viajes locales.
- En caso de no haber datos, si el presupuesto lo permite, hacer un estudio de generación de viajes en desarrollos con características similares a las del proyecto en cuestión.
- Se podría verificar fuentes extranjeras como el “Trip Generation” de ITE.
- Determinar el período (hora, fecha) de interés para el proyecto propuesto.
- Tomar en cuenta factores como el uso de transporte público, viajes con propósitos múltiples en desarrollos grandes, etc.
- Justificar los resultados e hipótesis utilizadas en la determinación de las tasas de generación.

Existen metodologías para los estudios de tasas de generación, todas basadas en conteos de los viajes que entran y salen del desarrollo en cuestión. El número de viajes debe ser relacionado con una variable independiente (por lo general se utilizan métodos de regresión estadística) que puede ser número de empleados, área de los diferentes usos de suelo del desarrollo, número de viviendas, etc.

En caso de usar tasas de generación del ITE, se debe tomar en cuenta que son tasas obtenidas de estudios en los EEUU, donde los patrones de viaje son diferentes a los nuestros, la propiedad vehicular es mucho mayor y el uso de transporte público es mucho menor.

Es importante notar que no todos los viajes a un desarrollo determinado (dependiendo de sus características) son exclusivos. Por ejemplo, el caso de la persona que pasa por el supermercado en su camino a casa regresando de trabajar. Este tipo de viajes no es una carga adicional para la red vial circundante, sin embargo, es una carga importante en los accesos y volúmenes de giro hacia y desde el desarrollo. La determinación del porcentaje de viajes de este tipo entre los viajes generados por el desarrollo es difícil de cuantificar. Existen pocos estudios al respecto. La aplicación de un factor de reducción de viajes para estos casos depende de la política de la agencia que exige el estudio.

Figura 11.2. Tránsito Generado por un Desarrollo Durante la Hora de Máxima Demanda en los Accesos

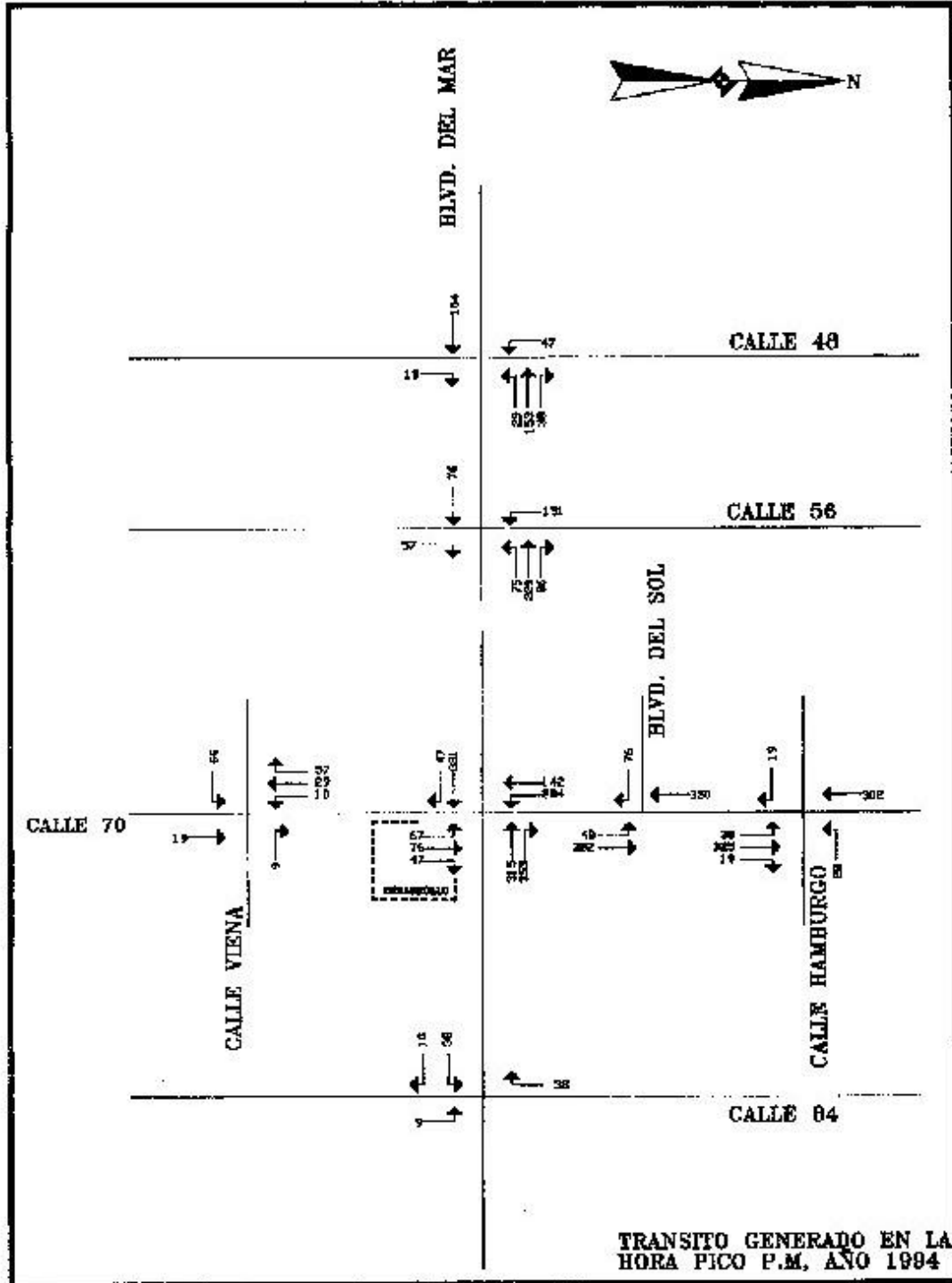
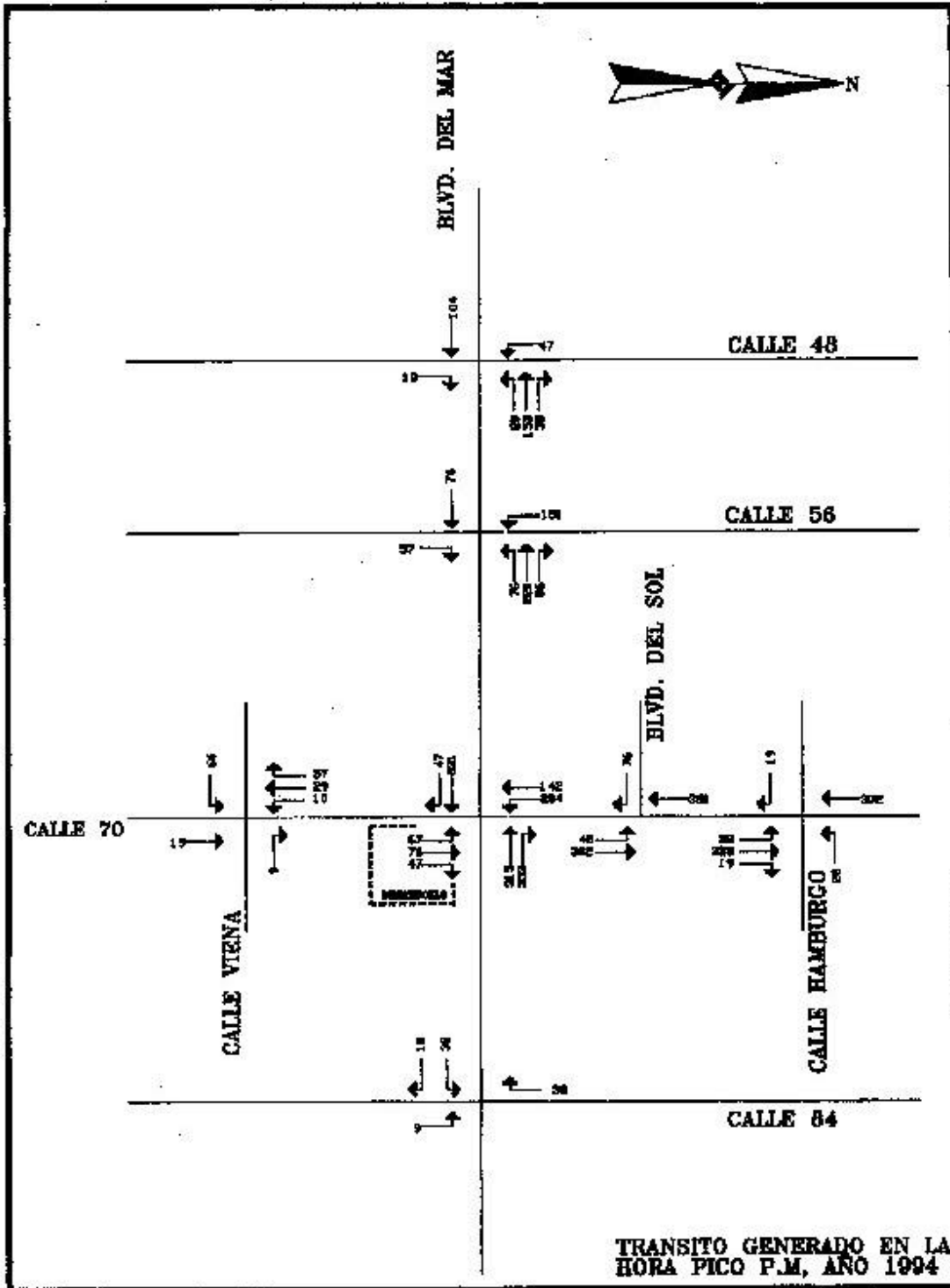


Figura 11.3. Tránsito Generado por un Desarrollo Durante la Hora de Máxima Demanda en la Red Circundante



8. DISTRIBUCIÓN Y ASIGNACIÓN DE VIAJES

Después de estimar el número de vehículos que entran y salen del desarrollo durante el período de estudio, el tránsito generado debe ser distribuido y asignado a la red vial circundante.

Para determinar la distribución de los viajes, es necesario considerar el área donde la mayoría de los orígenes y destinos de los viajes generados estén contenidos. La distribución de viajes puede ser estimada utilizando diversos métodos: por analogía (observando el comportamiento de los viajes de un desarrollo similar cercano), utilizando un modelo de distribución de viajes (ej. un modelo de gravedad) o utilizando datos de censo y empleo en el área. Las distribuciones de viajes resultantes deben ser aprobadas por la agencia que requiere los estudios antes de continuar el proceso de análisis de impacto vial.

En la asignación de viajes se deben tomar en cuenta las posibilidades de rutas específicas, las capacidades de la red vial circundante y los patrones de tránsito existentes. Una metodología popular, aunque no necesariamente la más adecuada, utiliza los porcentajes de giro existentes en las intersecciones de la red. Existen programas que facilitan esta tarea. La metodología usada para la asignación del tránsito sobre la red vial también debe ser aprobada.

Para cada periodo de análisis se estima el tránsito total proyectado, que es la adición del tránsito proyectado base y el tránsito generado por el desarrollo. El tránsito total proyectado es el utilizado para determinar la operación de la vialidad con el impacto del desarrollo.

Figura 11.4. Distribución de Viajes en los Accesos del Desarrollo

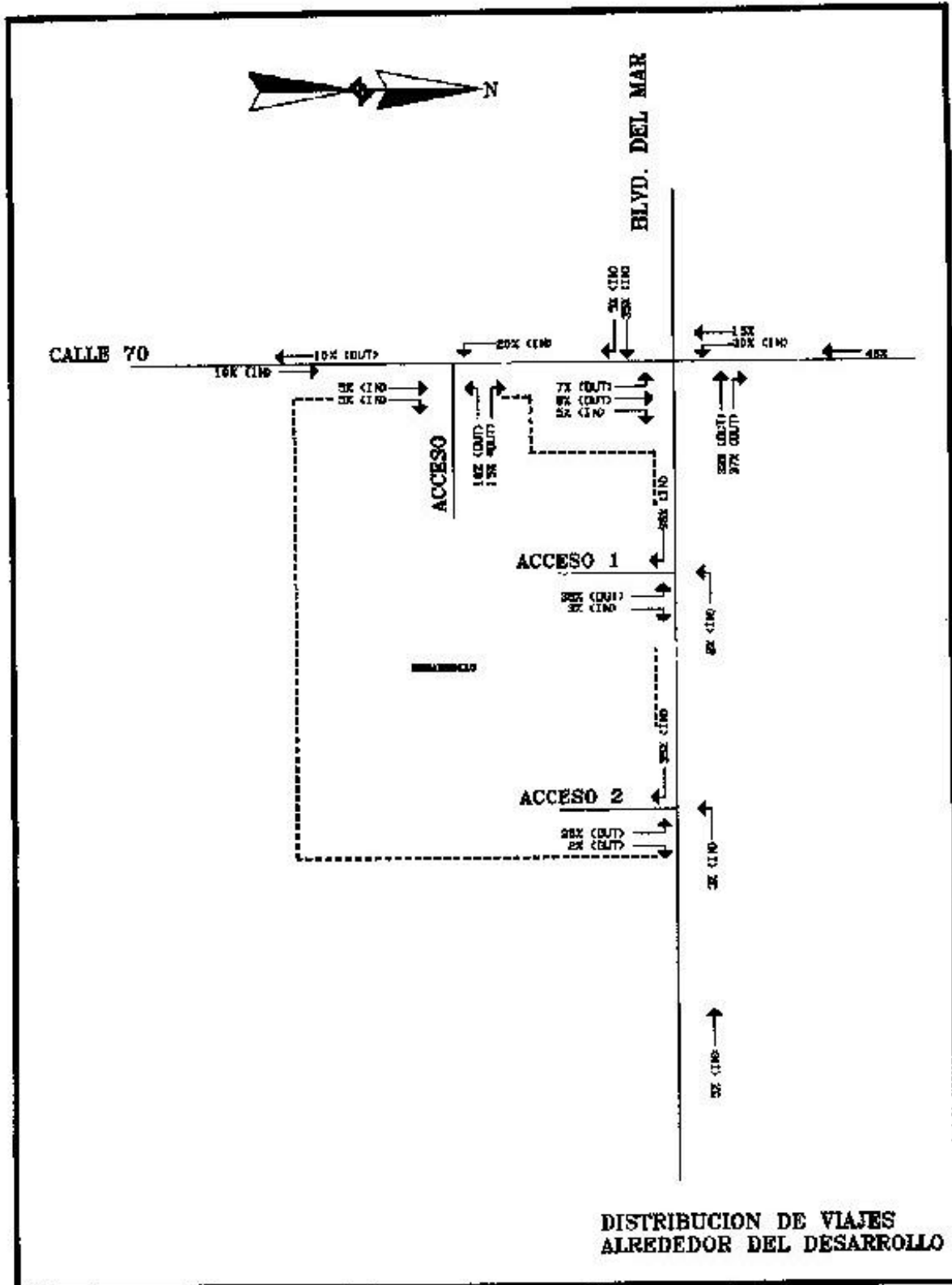


Figura 11.5. Distribución de Viajes en la Red Vial Circundante

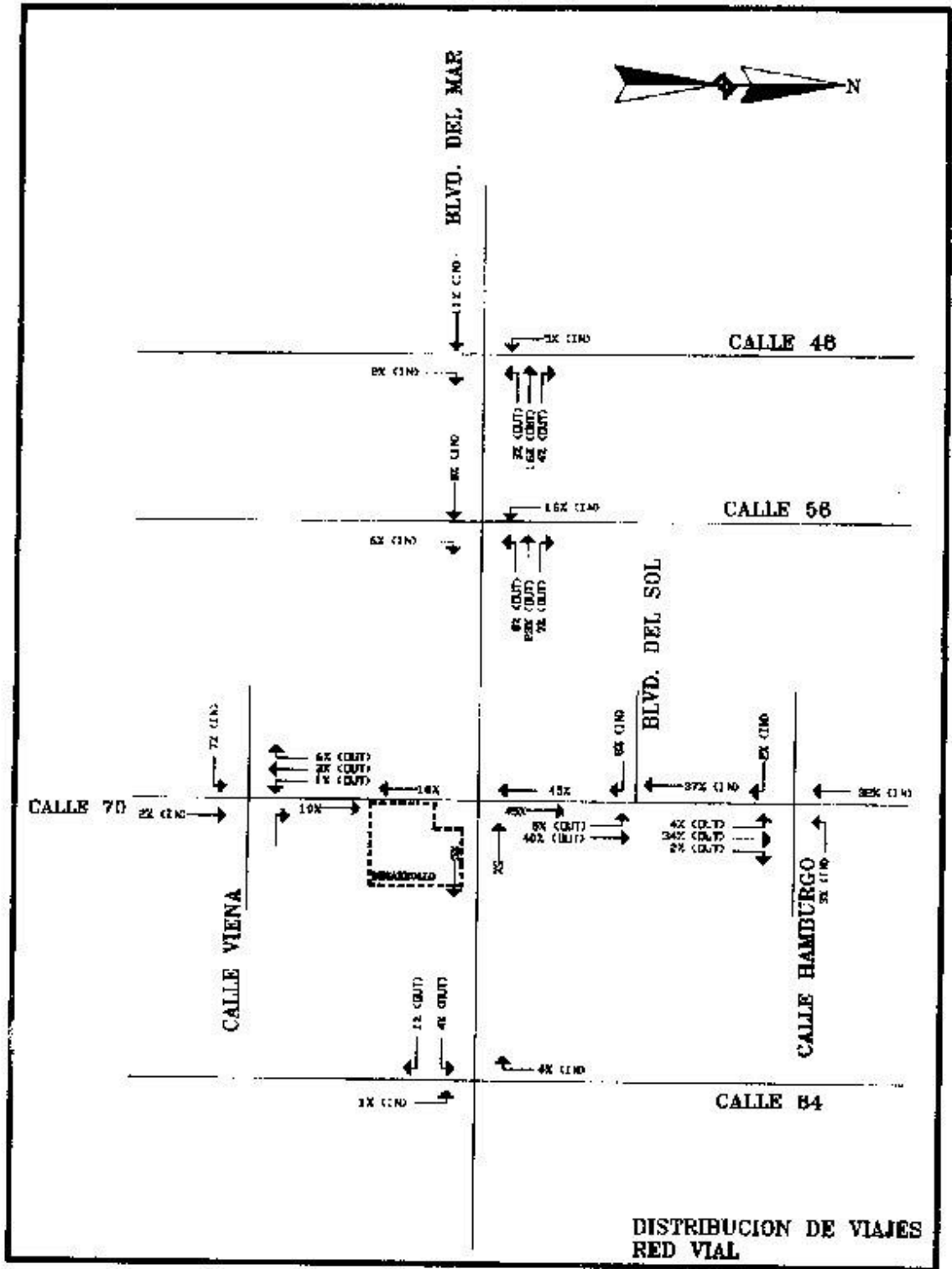
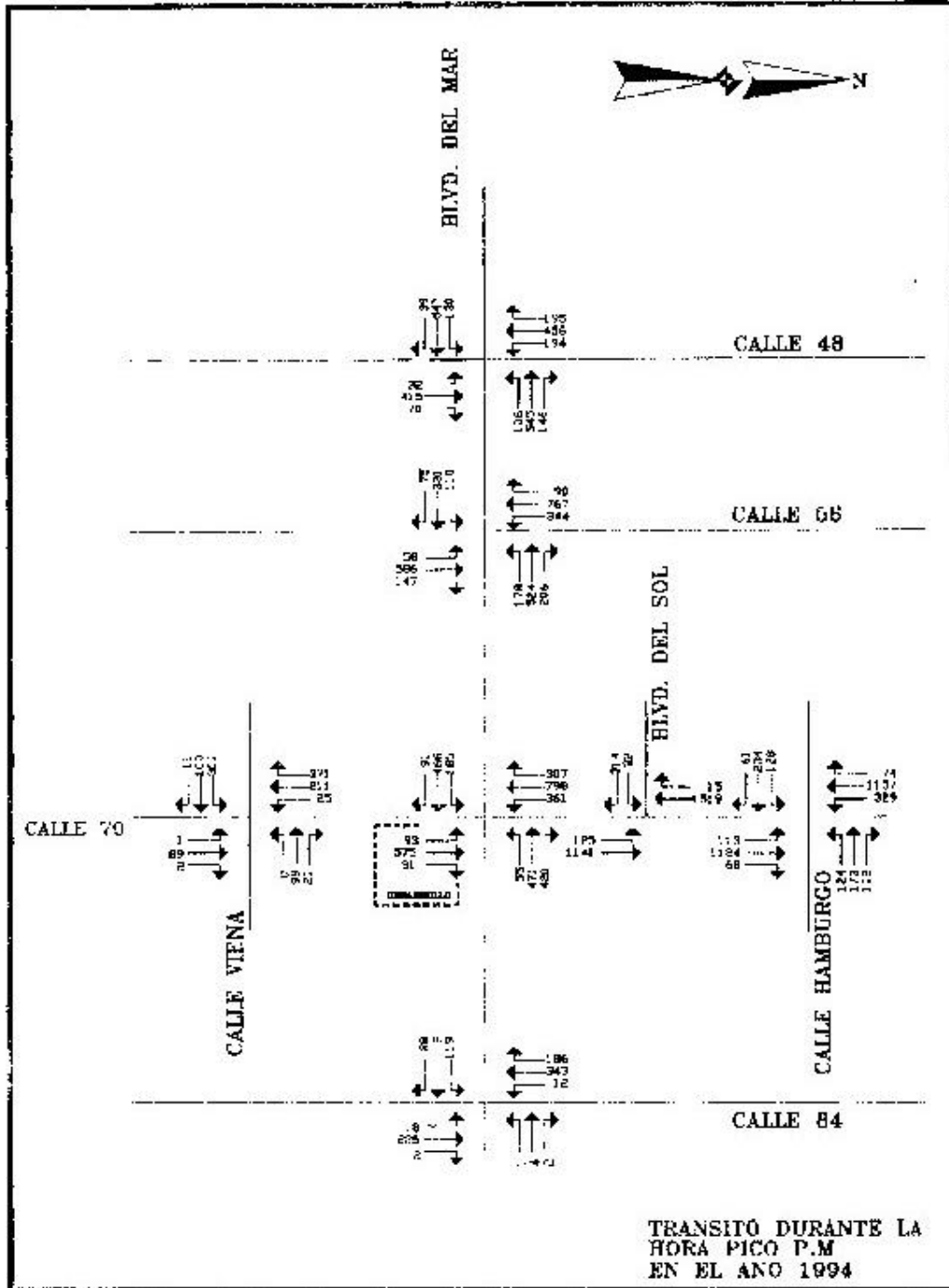


Figura 11.6. Tránsito Estimado en el Año de Inauguración



9. ANÁLISIS OPERACIONAL

La demanda de tránsito sobre la red vial a ser analizada en esta etapa del estudio esta determinada por las proyecciones de tránsito no relacionadas al desarrollo sumadas al tránsito generado por el desarrollo.

Se investiga el nivel de operación de la red vial alrededor del desarrollo utilizando la metodología de análisis de capacidad vial que se ha discutido en ponencias anteriores. Se deben efectuar análisis de capacidad de las intersecciones (semaforizadas o no) dentro del área de estudio. Dependiendo de las características del estudio, es posible que se requiera el análisis de intersecciones más lejanas, cuando estas sean puntos de acceso críticos al área de estudio o sean afectadas significativamente por el tránsito generado por el proyecto propuesto. Otros factores que, además de la capacidad vial, pueden ser incluidos en el análisis operacional son:

- Seguridad vial.
- Necesidades de control de tránsito del sistema (colocación de semáforos o cualquier otro dispositivo de control de tránsito).
- Impactos al sistema de transporte público o demanda adicional.
- Patrones de circulación del tránsito.
- Impactos a vecindarios colindantes con el desarrollo.
- Demanda por estacionamiento generada por el desarrollo.

El objetivo de estos análisis es obtener una visión de las implicaciones en el sistema de transporte del desarrollo en cuestión y la determinación de las mejoras viales necesarias para asegurar condiciones de operación del tránsito que sean aceptables.

10. DETERMINACIÓN DE MEDIDAS MITIGANTES DEL IMPACTO VIAL

Las recomendaciones y conclusiones del estudio tienen la finalidad de proveer el movimiento seguro, rápido y eficiente hacia y desde el desarrollo bajo estudio; minimizando los impactos operacionales al tránsito de paso (sin orígenes y destinos en el desarrollo).

Como una medida cualitativa de la eficiencia de la operación del tránsito (con una base cuantitativa) existe el concepto de niveles de servicio. Una operación del tránsito eficiente es aquella que opera a niveles de servicio aceptables para la comunidad. Nótese que los niveles de servicio aceptables varían acorde a la localidad. Comunidades densas toleran niveles de servicio menores que los tolerados en comunidades poco densas. Como objetivo de las medidas mitigantes en zonas urbanas se sugieren las siguientes:

- Todas las intersecciones deben operar, como mínimo, a nivel de servicio "D" durante la Hora de Máxima Demanda del sistema vial.
- En zonas donde los niveles de servicio sean "D" o peor antes de la construcción del desarrollo, este nivel de servicio debe ser mantenido o mejorado.

Para facilitar la comparación de escenarios y evaluar los impactos de la construcción del desarrollo, se deben obtener los niveles de servicio de la red vial en los siguientes casos:

- Niveles de servicio de las condiciones existentes
- Niveles de servicios de horizontes futuros sin incluir los volúmenes generados por el proyecto en cuestión. Mejoras a la vialidad deben ser incluidas.
- Niveles de servicio de horizontes futuros que incluyan el tránsito generado por el desarrollo, con y sin las mejoras propuestas para mitigar los impactos al tránsito.
- Niveles de servicio que incluyan los volúmenes de tránsito generados por otros desarrollos en el área de estudio.

Las mejoras propuestas deben ser a varios niveles: a nivel de la red vial que provee acceso al desarrollo, a nivel de la red vial inmediatamente adyacente al desarrollo y a nivel de los accesos al desarrollo.

Entre las mejoras propuestas se incluyen: adición o aumentar la longitud de carriles exclusivos para giros, cambios en los dispositivos de control de tránsito, cambio de los sentidos de circulación, etc. En la evaluación de las mejoras propuestas, se debe incluir en los análisis de intersecciones lo siguiente:

- Evaluación de la intersección bajo diferentes alternativas: construcción de carriles adicionales; cambio de fases y ciclos; instalación de dispositivos de control; modificación del uso de los carriles.
- Evaluación de la distancia entre semáforos y la progresión del sistema en los corredores.
- Evaluación de la longitud de las colas para determinar la longitud adecuada de los carriles de giro.
- Disponibilidad de derechos de vía para las mejoras geométricas.
- Impactos aguas abajo de mejoras propuestas.
- Factibilidad práctica de las mejoras propuestas.

Además de lo indicado anteriormente, es necesario un análisis detallado de las necesidades de estacionamiento del desarrollo según su uso de suelo.

11. PREPARACIÓN DEL INFORME

El propósito del informe es el de documentar el propósito, procedimientos, hipótesis, impactos encontrados, conclusiones y recomendaciones del estudio. Esto debe ser en forma concisa y clara, utilizando en lo posible cuadros, diagramas y figuras para presentar la información. El informe debe contener por lo mínimo:

- Propósito del estudio y objetivos.
- Descripción del desarrollo y del área de estudio.
- Condiciones existentes en el área que circunda el desarrollo.
- Desarrollos inminentes adicionales y mejoras a la vialidad inminentes.
- Generación de viajes del desarrollo y distribución modal.
- Distribución y asignación de viajes causados por el desarrollo.
- Proyecciones de tránsito.
- Análisis operacional de la red vial para estimar los impactos del tránsito generado por el desarrollo.
- Recomendaciones de mejoras a la red vial para mantener una operación de tránsito razonable y minimizar los impactos generados por el desarrollo.

Con el fin de que sirva como una guía, se presenta a continuación un índice típico para un estudio de impacto vial.

- I. Introducción
 - Características del Desarrollo
 - Usos del Suelo Propuestos e Intensidad
 - Ubicación
 - Planos Propuestos
 - Zonificación
 - Fases de Construcción
 - Ubicación del Desarrollo
 - Área de estudio

- II. Características de la Red Vial
 - Descripción de la Red Vial Existente
 - Mejoras Propuestas a la Red Vial
 - Operación del Tránsito Actual
 - Operación del Transporte Público

- III. Proyecciones de Volúmenes de Tránsito
 - Accesos Propuestos al Desarrollo
 - Generación de Viajes
 - Distribución de Viajes
 - Asignación de Tránsito Generado a la Red Vial
 - Volúmenes de Tránsito Proyectados (Base, para cada año horizonte)
 - Volúmenes de Tránsito Proyectados (Incluyendo Tránsito Generado, para cada año horizonte)

- IV. Análisis de Operación del Tránsito
 - Operación del Tránsito Base Proyectado (para cada año)
 - Análisis de Capacidad (Intersecciones semaforizadas y no semaforizadas, coordinación de semáforos)
 - Operación de Tránsito Proyectado, incluyendo Tránsito Generado (para cada año)
 - Análisis de Capacidad
 - Circulación en el Desarrollo y Necesidades de Estacionamiento

- V. Análisis de las Mejoras
 - Mejoras Necesarias para la Operación Aceptable del Tránsito Base Proyectado (cada año horizonte)
 - Mejoras Necesarias para la Operación Aceptable del Tránsito Proyectado, incluyendo Tránsito generado por el Desarrollo (para cada fase de construcción y cada año horizonte)

- VI. Recomendaciones

Índice de Cuadros

Análisis de Capacidad, Condiciones Existentes
Generación de Viajes

Análisis de Capacidad, Tránsito Base (para cada año horizonte)
Análisis de Capacidad, Tránsito Base más Generado (cada año horizonte)
Índice de Figuras
Ubicación del Desarrollo Propuesto
Volúmenes de Tránsito Existentes en las horas pico
Distribución de Tránsito en los Accesos
Distribución de Tránsito en la Red Vial Circundante
Volúmenes de Tránsito Base Proyectados (para cada año horizonte)
Volúmenes de Tránsito Base más Generado (para cada año horizonte)
Mejoras Recomendadas

BIBLIOGRAFIA

1. Pignataro L.J.; "Traffic Engineering, Theory and Practice"; Englewood Cliffs, N.J. Prentice Hall.
2. "Manual de Capacidad de Carreteras"; Special Report No. 209 del Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C.; versión española.
3. P.T. McCoy, U.R. Navarro; "Additional Lost Time of the Permitted Left-Turn Phase", Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1987
4. P.T. McCoy, U.R. Navarro, W. Witt; "Guidelines for Offsetting Left-Turn Lanes on Four-Lane Divided Roadways"; Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C., 1992.
5. "Manual de Dispositivos para el Control del Tránsito en Calles y Carreteras"; Secretaria de Comunicaciones y Transportes, Subsecretaria de Infraestructura; México, D.F. 1986
6. "Manual of Uniform Traffic Control Devices for Streets and Highways"; U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, D.C., 1988
7. "Traffic Control Devices Handbook"; Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Washington D.C., 1985
8. Florida Section of the Institute of Transportation Engineers, "Left-Turn Phase Design in Florida"; December 1981.
9. J.H. Kell, Iris Fullerton; "Manual of Traffic Signal Design", Institute of Transportation Engineers, Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J.
10. "Traffic Engineering Handbook"; Institute of Transportation Engineers; Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, N.J.
11. NC 198, Eight Phase Controller, Eagle Signal Controller, User Manual.
12. "Parking in the City Center", Wilbur Smith and Associates
13. Akcelik, R; "Signalized Intersection Capacity"